超精密フライス加工による三次元マイクロマシニングの高度化* (第2報, 工具系の高精度化)

沢田 潔^{*1}, 山本 明^{*1}
竹内 芳美^{*2}, 佐田 登志夫^{*3}

Advanced Three-Dimensional Micromachining by Means of Ultraprecision Milling (2nd Report, High-Precision Tool Chuch System)

Kiyoshi SAWADA, Akira YAMAMOTO,
Yoshimi TAKEUCHI and Toshio SATA

This study deals with the improvement of ultraprecision micromachining technology by devising a tool chucking mechanism. A lathe-type ultraprecision milling machine equipped with an improved pseudo ball end mill as a cutting tool was designed to create tiny parts with nm-order surface roughness. The dimensional accuracy and surface roughness are significantly influenced by the rotational accuracy of the pseudo ball end mills, which are mounted on the spindle using a chucking mechanism. To meet the requirement, a new chucking mechanism was devised as a substitute of a three-jaw-type chuck to improve the setting repeatability of the tool. The new chucking mechanism enables the tool to be rightly positioned within the range of 0.2 μm . As a result, the ultraprecision milling machine equipped with the chucking mechanism and the tool was able to produce a traditional Noh mask on a copper surface of 1 mm in diameter with a surface roughness of 58 nm (p-v). In addition, it was found that the contour line pattern observed on the mask surface was due to a three dimensional cutter mark.

Key Words: Micromachining, Lathe-type Ultraprecision Milling Machine, Pseudo ball End mill, High-precision Chucking Mechanism, Sculptured Surface

1. 緒 言

超精密加工技術は, 加工精度の要求されるポリゴンミラーなど光学部品やシリコンウエハなど半導体部品の製造技術を中心に発達し, 電子機器や光学機器などの各種機器の高精度化, 小形化, 高集積化に寄与してきた⁽¹⁾⁽²⁾. また, 最近ではマイクロマシニングに使用される超小形アクチュエータのような微細機構部品⁽³⁾など, 非常に体積の小さい加工物に適用されるケースも増えている⁽⁴⁾⁽⁵⁾. 今後は, 加工対象のさらなるマイクロ化に伴い, ナノメータオーダの加工精度を要求されることが予想される.

現在, これら微細加工は半導体製造技術であるエッチング等を利用して行われることが多く, それゆえに加工対象の材質や形状に制約を伴うこともある⁽⁶⁾. そこで, ある程度加工物の材質を選択でき, 加工面形状も平面, 球面の他, 自由曲面など複雑な三次元形状を加工できるダイヤモンド工具を用いた機械加工を適用して超精密微細加工技術を研究開発してきた⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾.

すでに, 三次元マイクロマシニングの例として $\phi 3$ mm の能面形状の加工を取上げ, 旋盤系超精密フライス加工機と微調形疑似ボールエンドミルを用いた超精密フライス加工とそのシミュレーションを報告した⁽¹⁰⁾. 本報は, その続報として三次元微細加工における工具およびその周辺機器, 特に工具チャックの高精度化について述べ, それらを用いて能面のさらなる微細化, すなわち $\phi 1$ mm 内への加工を行った結果を報告するとともに微細な表面の観察からわかる等高線模様についても考察する.

2. 超精密三次元マイクロマシニング システムと工具系

2・1 加工機の構成 使用する加工機は, X, Z, C の3軸から構成される旋盤系の超精密加工機で, 三次元加工時は C, X 軸の協調動作により疑似 Y 軸を作り出す. 加工物は C 軸側に取付けられ, 工具は X 軸上に設置された高速エアスピンドルのチャックに固定される. これらは人工コンクリート内蔵の鋳物製ベースで支持され, ベース自体は空気+油減衰式振動遮蔽台の上にある. 各軸はサーボモータ, ねじ, ナットなどで構成され, すべてのしゅう動面に静圧空気軸受を採用したため, スティックスリップの原因となる摩擦

* 原稿受付 1997年1月17日.

^{*1} 正員, ファナック(株) (〒401-05 山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場 3580).

^{*2} 正員, 電気通信大学 (〒182 調布市調布ヶ丘 1-5-1).

^{*3} 正員, 豊田工業大学 (〒458 名古屋市天白区久方 2-12-1).

Fig. 1 Structure of high-speed air turbine spindle

のないサーボ系を実現できている。最小分解能は X, Z 軸で 1 nm , C 軸で 0.0001 deg であり、モータ直結の光学式エンコーダ ($64\,000\,000\text{ pulse/rpm}$) によるセミクロズ制御を採用している。 X, Z 軸の真直度は $\pm 0.01\text{ }\mu\text{m}/200\text{ mm}$, C 軸の回転精度はラジアル、アキシャル方向ともに $\pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ 程度である。

2・2 高速エアスピンドル 微細な三次元加工は、 C 軸側に取付けられた加工物と X 軸上に据え付けられた高速スピンドルとの間で行う。この高速エアスピンドルは、高速回転を得るための空気タービン式の主軸ヘッドであり、回転振れが小さく、高精度な安定した回転が要求される。後述の微細加工用工具である単結晶ダイヤモンド製の一枚刃の疑似ボールエンドミルを取付ける。

構造は図1に示すように、タービンプレードを2枚の板で挟み、上部から取入れた圧縮空気で駆動する。軸受は機械の他の部分と同様に空気軸受を採用しており、ブレード両端面と前後のシャフトラジアル部が空気軸受となっている。構造上の特徴としては、サーボモータについてもいえることだが、図1中A, B, Cの主要構造物間には、一般的な工作機械で見られるような組立上のインローをもたないことが挙げられる。インローがあるとインロー部の加工精度等が原因で左右の部品の同心を出すことが難しくなるからであり、高精度な同心性を得るためにここでは空気軸受自身が左右の部品を組立てる際の案内となるようにインローなしの合せ構造とした。

この高速エアスピンドルは最高回転数が約 $60\,000\text{ rpm}$ で、回転精度は測定の結果から $\pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ となっている。

主軸ヘッドとその取付台との間には圧電素子が組込まれており、工具刃先を微細に位置制御することができる。さらに、シャフト後部は電磁ブレーキが組込まれており、切削加工以外の低速回転が必要となる放電加工等にも使用できるようになっている。

Fig. 2 3-jaw-type chuck

2・3 工具チャック 前報までの超精密加工においては、工具チャックとして図2に示すように三爪式のコレットチャックを用いてきた。前述の高速エアスピンドルとともに用いるためにはコレット部をスピンドルシャフト部と一体にする必要がある。しかし、シャフトの製作上、スピンドル軸と工具を把持したときのコレットの軸を一致させることは難しい。また、マイクロ加工に限らず加工によっては粗加工と仕上げ加工ごとに工具を交換したり、工具摩耗により工具交換する場合があるので、その工具交換前後で工具心のずれを極力小さくすることが要求される。三爪式コレットチャックは、三つの爪を均等に締めることが困難なため、工具の交換ごとに心ずれを起こす可能性が高い。特に三次元マイクロ加工においては、後述するように微細で高精度な工具先端形状が要求される。工具交換に伴う刃先先端位置のずれは、加工される三次元面形状に大きな影響を与えるため、締付再現性のある別方式の工具チャックが必要となる。

2・4 ダイヤモンド工具 使用する工具は一枚刃の単結晶ダイヤモンドバイトであり、工具刃先先端の三次元的な位置を微調整できるようにダイヤモンドがついた先端部分をシャンクから分離することが可能となっている。これにより、工具すくい面の芯高さ、ならびに刃先先端の左右方向へのずれ(オフセット量)を管理することができる。現在は顕微鏡等を用いた目視によって行っているが、ダイヤモンドチップ部をシャンクに取付ける際に、このような微細な工具先端寸法を実測しながら行うのはかなりの困難を伴っており、新しい工具刃先の微細調整方法を開発する必要がある。

3. 高精度工具チャックの開発

3・1 高精度工具チャックの構造 高速、高精度に工具を回転させるには、駆動主軸である高速エアスピンドルの精度と工具自体の精度に加えて、工具チャックの精度も重要である。三次元マイクロ加工用に開

Fig. 3 High precision tool chuck

発した小形の高精度工具チャックについて述べる。図3にその外観を示す。左はチャック単体、右は工具であるダイヤモンドバイトを把持した状態である。この構造は、チャックホルダ本体とダイヤフラムタイプの薄肉部分をもったスリーブ、押込みピン、クランプ用ボルト、圧力媒体となる流動性のシリコンゴムから構成される。試作した工具チャックは6 mm シャンクの工具が入るよう、それに合せてスリーブ内径を仕上げた。

チャッキングの動作は、工具をスリーブに差し込み、上方からクランプボルトを締め付けることにより押込みピンが押され、圧力がシリコンゴムを介してスリーブに伝わり、スリーブ円筒外周の薄肉部を内側に变形させてダイヤフラム式に工具を把持するようになっている。圧力媒体としてシリコンゴムを採用したのはこのチャックの気密性を重視し、内部流体の漏れを防ぐためである。この際、円筒はその中心を保持したまま収縮するので工具の差し替えに対しても工具はいつも一定の中心を保つことができる。締付部は対称に2箇所あるが、工具交換時は片方のクランプボルトだけを用い、一方のクランプボルトは締め付けたままとした。

スリーブ薄肉部がクランプボルトの締め付けによりどの程度変形するのかを構造解析により計算した結果を図4に示す。円筒部を円周方向に12等分し、外周からの締付力を締付トルクから換算して内径の変形量を調べたところ、半径で約1 μm 小さくなることがわかった。これにより、スリーブ内径の仕上げ寸法を $\phi 6 + 0.001 \text{ mm}$ とし、1 μm の変形でも工具の締付けができるように設計した。

3・2 高精度工具チャックの製作 工具チャックの内部断面を図5に示す。組立の際、スリーブのチャックホルダ本体への接着後、クランプボルトのかわりに止め栓を取付け、ホルダを逆において側面にある横穴からシリコンゴムを注入する。ここで、シリコンゴ

Fig. 4 Deformation of high precision tool chuck sleeve

Fig. 5 Structure of high precision tool chucking mechanism

ムの内部すきまへの完全充てんが重要になるが、注入後デシケータ中で、内部にたまった空気を抜きながらシリコンゴムを硬化させることで完全充てんを可能とした。また、押しピンとチャックホルダ本体穴のすきまをつめ、さらに押しピンの当たるシリコンゴム端面を仕上げた止め栓の端面で平滑に硬化させることで締付時のシリコンゴムのかみ込みを防ぐようにした。したがって、Oリングは使用していないシンプルな構造となっている。シリコンゴムを注入した横穴をふさぎ、最後にスリーブ内径を研磨し、止め栓を押しピンとクランプボルトに変えて完成となる。高速スピンドルに取付けて使用するため、最後にホルダ外径部分を削って動バランス調整を行う。

3・3 工具心のずれ測定試験方法とその結果 工具チャックは工具交換を行ったときの工具心のずれが小さいことが要求される。そこで、このチャックの工具脱着前後における工具心のずれを測定した。方法は、図6のように工具の代わりに先端にベ어링用鋼球

Fig. 6 Measurement of tool center position

Fig. 7 Improvement of tool center position

(真球度約 $0.04\ \mu\text{m}$)を取付けた外径 6mm のピンを把持させ、接触式の真円度測定機(TARYROND73)を用いて、測定機主軸中心と鋼球中心の同軸度を測定するものである。次に、一度ピンをはずして再把持させ、同様の測定を段取りを変えずに行い、同軸度を求める。そこで、この二つの同軸度のずれを比較し、これを工具心のずれとする。また、測定に当たっては、1回の取替えにおける把持の同心性のみを問題とし、脱着の再現性をより確かなものとするため、把持させるピンにはスリーブ上部とかみあうストッパを設け、高さや位相を再現し、ピンの倒れやピンと球の同心性は測定に影響を与えないようにした。さらにクランプボルトの締付量も管理した。

従来から一般に用いられている精密コレットチャック(シャンク径 10mm)についても同様の方法で工具脱着前後の工具心のずれ測定を行い、試作した高精度工具チャックと比較を行った。その結果を合せて図7に示す。図7中の○はピン脱着後の工具中心がどの方向にどれだけ移動したかを表す。コレットチャックに比べ、高精度工具チャックの工具心のばらつきも小さく、1回の着脱誤差はコレットチャックが最大約 $5\ \mu\text{m}$ であるのに対し、約 $0.2\ \mu\text{m}$ 以内にとどまっており、

Fig. 8 Configuration of pseudo ball end-mill

非常に良好な再現性が得られた。したがって、この高精度工具チャックを用いることにより、従来よりも容易に、しかも工具心のずれを少なく、小形の工具を同心に取り替えることが可能となる。

4. 能面加工の微細化

4.1 NCデータと工具形状 三次元マイクロマシニングシステムを利用して三次元自由曲面加工の例として直径 1mm の中に納まる能面を加工した。能面の形状データは、 $\phi 210\text{mm}$ 、高さ 70mm の鋳鉄製の实物から縦 0.2mm 、横 0.2mm ごとの高さをディジタイザにより取込み、さらに $1/210$ にスケーリングして $\phi 1\text{mm}$ の中に入るように作成した。また、工具の円すい角が 45° のため、能面の傾斜の急しゅんな箇所では工具の刃のない箇所が干渉しないように高さだけをさらにスケーリングして最大高さを $30\ \mu\text{m}$ とした。ディジタイザでの計測に用いたプローブは直径 $\phi 14\text{mm}$ (先端半径 7mm)のボール形状をしているので、正確な工具オフセットのためには工具の刃先半径を同じ比率で縮小し、刃先半径を $33\ \mu\text{m}$ にする必要がある。しかし、工具成形の制約から $70\ \mu\text{m}$ の刃先半径とした。工具先端形状を図8に示す。

4.2 加工方法および条件 高速回転させた工具を送り方向と同時に切込み方向に移動させ、次にピックフィード方向にシフトさせて加工を行う。このプロセスを繰返して三次元自由曲面形状を削り出す。加工機はC、X軸の協調動作により疑似Y軸として機能するため、加工物をC軸面板の回転中心から 10mm オフセットした位置に取付ける。したがって、ディジタイザで計測したデータはX、Z、Cの極座標系デー

タに変換される。加工環境は室温を $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ に管理された防振構造の建物の内部であり、加工液としてミスト状の白灯油を間欠的に加工物に吹き付けた。被削材は無酸素銅である。

ダイヤモンドエンドミルは刃先が鋭利で欠けやすく、1回の切込み量が数 μm 程度と大きくできないため、市販の超硬合金製ボールエンドミルで数十 μm 程度の大きな切込み量で荒加工を行い、その後でダイヤモンドエンドミルで仕上げ加工を行う2段階方式を採用した。その結果、図9に示すような荒/仕上げ時の送り速度の違いによる工具パスの違いで能面の顎、頭部分に荒加工跡が生じた。

そこで、次の3点の工夫を加え、加工を行った。第1に荒加工跡をなくすため、CNCのイグザクトストップ機能を用いて、送り速度が変化しても各加工点を必ず通過するようにした。第2に、それぞれ別々にデジタル化されたデータを用いて荒/仕上げ加工を行っていたが、これを一つのソースデータからそれぞれの加工プログラムを作成し、デジタル化自身の繰返し誤差等によるプログラム上の相対誤差をなくした。第3に、超硬合金製ボールエンドミルとダイヤモンドエンドミルとの工具半径誤差や、工具交換時の段取り変えによる工具位置誤差をなくすため、荒/仕上げともにダイヤモンドエンドミルで行うようにした。荒加工での切込み量を大きく取れないため、加工回数が増えるが、荒加工の時間が短いことや段取り変えの時間が

なくなるため、かなりの時間短縮が図れ、総加工時間は当初は11時間を要していたものが最終的に3時間となった。また、加工形状に関しては、先に述べた高精度工具チャック等の利用により、工具オフセット量の管理が向上したこと、工具自体の成形精度が向上したことにより削りすぎを解消できた。加工条件は表1のとおりである。

4・3 加工結果 $\phi 1\text{ mm}$ の能面の加工結果を形状改善の状況に合せて図10に示す。左は三爪式コレットチャックを用いたもので、能面形状は、チャックの形状精度および脱着の繰返し精度が満足するものではなかったため、結果的に工具の刃先オフセット量が過大となり削り過ぎをおこしている。中央は高精度工具チャックを用いて加工したもので、チャック自体の同心性が向上したため、工具の刃先オフセット量と工具チャックのスピンドルへの取付誤差のみが工具刃先の振れとなり、かなり削り過ぎが改善された。右はさらにバイト自体も形状精度を向上させ、締付トルクの管理などを行い、刃先半径も小さく製作して加工したもので非常に良好な形状が得られた。図11は走査形白色干渉計(Zygo NEWVIEW 100)による表面粗さの測定結果で、前報の $\phi 3\text{ mm}$ の能面とほぼ同等の粗さ $58\text{ nm}(p-v)$ が得られた。

5. 能面の表面観察

5・1 等高線模様の観察 これまで加工した能面の表面を詳細に観察すると、顎部分を中心にして図12の等高線状の模様が観察される。また、図13に能面各部を拡大した走査形電子顕微鏡(SEM)による観察例を示した。ほぼ全面に渡って微細なカタマークにより形成される等高線模様が見られた。実物の能面にはこのような模様は確認できないため、加工上何らか

Fig. 9 Roughly machined workpiece

Table 1 Machining condition

Rotational speed	50000 rpm		
Depth of cut	$2\text{ }\mu\text{m}$		
Pick feed	Rough cut $21\text{ }\mu\text{m}$	Finish cut $3\text{ }\mu\text{m}$	
Feed rate	Rough cut 50mm/min	Finish cut 5mm/min

Fig. 10 Improvement of $\phi 1\text{ mm}$ Noh mask

Fig. 11 Surface roughness near forehead

Fig. 12 Contour line appeared on $\phi 1$ mm Noh mask

Fig. 13 Observation of machined surface by SEM

の原因が存在すると考え、解析を行った。

5.2 等高線模様発生メカニズム 傾斜の大きい形状を加工する場合、図14に示すように断続切削となるため、送り速度、工具回転数、切込み量、工具形状に関係した形の Cutter mark が現れる。例えば、図15に示すような円すい形状の加工を考えると、断続切削による Cutter mark の形状は工作物形状の法線方向に向くため、上方から見ると下図のような Cutter mark 群が現れると考えられる。したがってピッチフィード量が小さくなるとこれらが微細につながってくるため、全体としては等高線模様の模様が形成されることになる。今回の $\phi 1$ mm の能面の Cutter mark の間隔は $0.1 \mu\text{m}$ となっているが、さらなる面粗さの向上を狙うには、この間隔を小さくするため工具回転数を上げるか、送り速度をより遅くする必要がある。また、Cutter mark に起因する等高線模様とは別に、幅の広い等高線模様も見られる。加工プログラムデータを解析

Fig. 14 Creation of cutter mark

Fig. 15 Cutter mark creation on conic surface

したところ、ディジタイザの計測誤差および実物の能面の元形状と思われる階段状の形状データが確認され、この階段状部分の光の反射具合で観察されるのではないかと考えられ、加工上の問題ではないと思われる。

6. 結 言

超精密フライス加工による三次元マイクロマシニングの高度化を目指し、主に工具系の高精度化に取り組んだ研究から次のような結論が得られた。

- (1) 三次元微細加工にとって重要となる工具およびその周辺機器、特に工具チャックの高精度化を行い、脱着の再現性のよいシンプルな小形チャックを開発した。
- (2) これらの機器を使い、三次元微細加工の例として $\phi 1$ mm 能面の加工を行い、良好な形状と表面粗さ $58 \text{ nm} (p-v)$ を得た。
- (3) 能面の表面に観察される等高線模様を解析し、その発生メカニズムは三次元的な Cutter mark によるものであることがわかった。

本研究を進めるにあたり協力していただいたファナック(株)の河合知彦, 今井圭介, 尾高俊一, 平井俊雄, 中村有一郎, 志村徳久の各氏に感謝する。なお, 本研究の一部は, 通産省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術開発」の一環として, NEDO から委託を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務として実施したものである。

文 献

- (1) 薄木雅雄, オプトメカトロニクス時代の超精密切削技術, (1991), 72, 日本オプトメカトロニクス協会.
- (2) 田中克敏, 東芝機械技術資料, (1986), 73.
- (3) 藤田博之, マイクロマシンの世界, (1992), 13, 工業調査会.
- (4) 上田勝宣, 精機学会春季大会学術論文集, (1986), 869-870.
- (5) 増沢隆久, 精密工学会誌, **60**-1(1994), 13-15.
- (6) 佐藤一雄, 精密工学会誌, **53**-6(1987), 849-852.
- (7) 竹内芳美・ほか3名, 機論, **58**-554, C(1992), 3116-3121.
- (8) 竹内芳美・ほか3名, 機論, **59**-566, C(1993), 3193-3198.
- (9) 沢田潔・ほか4名, 機論, **60**-577, C(1994), 2932-2937.
- (10) 沢田潔・ほか4名, 機論, **61**-587, C(1995), 3129-3135.