超精密フライス加工機による微小部品加工の試み*

竹内芳美** 西江 真*** 沢田 潔† 佐田登志夫††

Machining of Micro-parts by Ultra-precision Milling Machine

Yoshimi TAKEUCHI, Makoto NISHIE, Kiyoshi SAWADA and Toshio SATA

The requirement of producing metallic micro-parts for micro-machine and/or micro-mechanism will be increased. The study deals with manufacturing of tiny parts in mm-size by use of micro-machining technique of an ultra-precision milling machine. The ultra-precision milling machine, consisting of Z-motion table, positional spindle on it as C-rotational axis, X-motion table, is equipped with a pseudo-ballend mill composed of a single crystal diamond tool mounted at the top of high speed air spindle on X-motion table. A new manufacturing procedure is devised to manufacture a propeller of 3 mm in diameter as an example of micro-parts by use of ultra-precision milling machine. On the basis of CAD data of a propeller, two kinds of NC data, for front face and back one, are generated to machine the whole shape together with preparation of jig. It is found that the machined propeller mounted to the micro motor shaft works.

Key words: ultra-precision milling machine, micro-parts, pseudo-ballend mill

1. 緒 言

最近、電子、光学分野、機械加工分野における超精密微細加工技術の発達に伴って、各種機器の小型化、高集積化が進んでいる。この超精密微細加工技術は大きな関心を集めているマイクロマシンの要素技術としても注目されている。マイクロマシンの実現のためには、超小型のアクチュエータなどの微小機構に必要な微小部品が不可欠であり、これらの加工技術として3次元的な超精密微細加工技術が重要となる¹⁾。

現在行われている3次元的な微細加工技術は2つに大別できる。1つは薄膜形成やエッチングなどの半導体製造技術を応用したものであり、もう1つは切削や研削、放電加工などの従来からの機械加工技術を高精度化・微細化したものである。

前者は基本的に2次元的な加工を高さ方向に積層させながら3次元形状を形成して行くため、微細化は可能であっても加工できる形状は制約を受けるだけでなく、被加工物の材質が制限されるため、応用には一定の限界がある。層形成技術の一種である光造形法を微小部品加工に応用した研究も発表されているが、材料は樹脂に限定されていることが多い²⁾。いずれも微細加工ではあっても超精密加工であるとは言い難い。

後者の場合、主に固体工具を使用するため被加工物材質を選ばないこと、3次元的な加工ができること、などの利点を持ち、工具の工夫次第では3次元微細加工に十分適用できる。

そこで、マイクロ部品の加工方法としてこれらの中でも生産性が高く、加工の自由度や相対精度の面でも特に優れている切削加工に注目し、旋盤系の超精密加工機にダイヤモンド工具を改良した擬似ボールエンドミルを搭載し、超精密フライス加工によって2次元的な微細加工をすでに試み、良好な表面粗さと形状精度を得たことを報告した³⁾。さらに、擬似ボールエンドミルに改良を加えた微細加工用工具を開発し、CAD/CAMシステムを導入して3次元的な微細加工を試みる⁴⁾とともに切削機構のシミュレーションを行うことによって複雑な3次元形状

の高精度加工を達成したことも報告した⁵⁾。

本稿は、今までに完成品として得られていないような複雑な3次元形状の超精密微小部品の加工を試み、微小部品を示すことによって1つの解決法を提示しようとするものである。微小部品として時計の秒針軸の歯車などが量産されているが、そのような要素部品を専用加工機で微細加工するものとは異なり、自由曲面をもつ複雑な形状部品を汎用的に製作する手法を確立しようとすることに主眼を置いている。ここでは、自由曲面をもつ微小部品として、外径3.0 mmの羽根車形状を加工対象に取り上げた。

2. 微小部品加工システム

2.1 超精密加工機

実験で使用する超精密加工機の概略を図1に、またその仕様を表1に示す。この加工機は並進2軸(X, Z)と回転1軸(C)からなる3軸制御超精密加工機であり、本来旋盤加工機であるが、C軸をX軸と連動させることによって擬似的にY軸として使用し、空間内の任意の点に位置決めできる。X軸テーブル上には工具を取り付けた回転主轴が設置されフライス加工

Fig. 1 Ultra-precision milling machine

* 原稿受付 平成7年10月24日

** 正会員 電気通信大学(調布市調布ヶ丘1-5-1)

*** 学生会員 電気通信大学

† 正会員 ファナック(株)(山梨県忍野村)

†† 名誉会員 豊田工業大学(名古屋市天白区久方2-12-1)

Table 1 Specifications of ultra-precision millig machine

Resolution	X-axis	1 nm
	Z-axis	1 nm
	C-axis	0.000 1°
Straightness of X, Z axis		30 nm/200 mm
Rotational accuracy of C axis and spindle		$\pm 0.01 \mu\text{m}$
Maximum rotational number of spindle		55 000 min ⁻¹

Fig. 2 Configuration of pseudo-ballend mill

が可能となっている。各軸の案内機構、軸受部、サーボモータなどの回転部には静圧空気案内、軸受構造を採用しており、摩擦のないサーボ系を実現している。また、サーボモータは6 400万 pulse/revの分解能をもつ光学式ロータリエンコーダを内蔵している。これらをセミクロズド制御することにより高い送り、割出し分解能を得ている。また、Xテーブル上の主軸はエアタービンで駆動し、最高回転数は約55 000 min⁻¹である。

これらの装置全体は、床面からの振動と機械装置自身から発生する振動の影響を排除するために空気+油方式の減衰装置をもつコンクリート内蔵の鋳鉄製のベースの上に設置されている。さらに、本加工機は塵埃、振動、温度変化の影響を避けるため、耐震設計され、 $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ に温度管理されたクリーンルーム内に設置されている。

2.2 工 具

微小部品加工を実現するためには工具も微細な先端切れ刃を持ったものが必要となる。これまでに、超精密フライス加工用に単結晶ダイヤモンド工具を改良した擬似ボールエンドミル⁶⁾、および3次元マイクロマシニング用にさらに工具先端を微細にする等の改良を加えたマイクロマシニング用工具については報告した⁴⁾。

本研究ではこのマイクロマシニング用工具の工具先端をさらに小さくしたものを擬似ボールエンドミルとして用いて、超精密フライス加工による微小部品加工を行う。この工具の概略図を図2に、工具先端の拡大図を図3に示す。刃先は切削速度ゼロを避け、加工面のむしれを防ぐために半径方向に微小にオフセットされている。

2.3 CAD/CAM システム

微小部品加工用のNCデータはCAD/CAMシステムP-CAPS/CAD⁷⁾をnmに対応できるように改良したシステムを用いて作成する。このシステムの概略を図4に示す。CAD部は

Fig. 3 Expanded view of diamond cutting edge **Fig. 4** Structure of software system

3次元ソリッドモデルを採用しており、CAM部は工具経路生成に逆オフセット法を採用している。

簡単にNCデータ生成までの流れを示す。CADで形状定義を行うと内部表現用のCSGデータと画面表示用のB-repsデータが出力される。CAMでCSGデータを格子空間モデルの変形であるZ-mapに変換する。Z-mapは3次元形状をX-Y平面上の微小な格子で近似したもので、各格子要素はただ1つのZ値を持つ構造となっている⁷⁾。このため、表側と裏側のある部品形状では、データは表側用と裏側用の2種類に分かれる。

次に、それぞれのZ-mapに対して逆オフセット法を適用して工具オフセット面を生成する。ここで、逆オフセット法とは加工対象形状の表面上に沿うように逆転工具の工具中心を動かしたとき、逆転工具の軌跡である包絡面が工具オフセット面になっているという考え方である⁸⁾。この工具オフセット面に対し加工機固有の座標系に適応するように座標変換を施し、NCデータが出力される。

2.4 加工手順

本研究では、3軸制御のフライス加工で3次元形状の微小部

Fig. 5 Procedure of machining

品を削り出すことを目的としたが、一般にフライス加工だけでは任意の3次元形状を削り出すことはできない。そこで本研究では図5に示すように加工手順を工夫し、ワークを加工途中で180°反転させることにより両方向からの加工を行うことでその解決をはかり、羽根車の製作を行った。その手順の概要を以下に示す。

- ① 形状定義とNCデータの作成：2.3節で示したCAD/CAMシステムで、加工対象形状を定義し、超精密加工用CAMによってNCデータの生成を行う。この時点で表側、裏側加工用の2種類のNCデータが出力される。
- ② 表側の加工：表側加工用NCデータで表側の加工を行い、軸穴をドリル加工する。
- ③ ジグの加工：表側加工時に加工された軸穴に適合する軸部をもったジグを加工する。
- ④ 接着：ジグに接着剤を注入しながら、取り外した表側加工後のワークを180°反転した状態で取り付ける。接着時には位置合わせを正確に行う必要があるが、これについては図6に示すような方法をとった。始めにC軸回転中心に対称に表側用ワークとジグを取り付ける。その後、表側の加工を行い、加工後のワークとジグの双方のX軸上の同じ位置にボールエンドミルで目印をつける。次に加工済みのワークを取外しジグに熱可塑性の接着剤を注入しながら接合し、ドライヤーで温めながら目印が合わさるように微調整を行う。この際目印の合わせり具合の確認には光学顕微鏡を用いる。このようにして裏側加工用の新しいワークができる。
- ⑤ 裏側の加工：このようにしてできた裏側加工用のワークの断面図を図7に示す。これを点線部が現れるまで加工し、ジグからワークを取り外して完成となる。

3. 加工実験と考察

実際にCADで定義した羽根車形状のディスプレイ表示の写真を図8に示す。この形状は外径3.0mm、高低差0.7mm、

Fig. 6 Adjustment of the mark

Fig. 7 Cross-sectional view of machining the backside of propeller

Fig. 8 Defined shape

羽根の厚さ0.15mm、羽根部の最大傾斜約20°となっている。3枚の羽根はそれぞれ同一のものであり、1つの連続した自由曲面で構成されている。

ダイヤモンドバイトでは一般に1回に数 μm の切込みしか行えない。従って形状の高低差が本実験の場合のように大きい場合は加工に非常に時間がかかり効率が悪い。そこで、前加工として $\phi 0.2\text{mm}$ の超硬ボールエンドミルで荒加工を行い、その後、仕上加工としてダイヤモンドバイトを用いた加工を行う。この超硬ボールエンドミルを用いた場合、1回に50 μm 程度の切込みが可能である。

仕上加工時の切削条件を表2に示す。また、加工中には切りくずの除去と加工面の酸化防止のためにEDM加工液を間欠的に噴霧した。被削材は $\phi 5.0\text{mm}$ のポリゴンミラー用アルミニウムである。加工中の様子を図9に示す。

加工後の拡大写真を図10に示す。このような3次元的な微細形状を測定できる装置がないため、定量的な評価はできな

Table 2 Machining condition

Rotational number of spindle min^{-1}	50 000
Feed rate mm/min	10
Pickfeed amount μm	5
Cut depth μm	2

Fig. 9 In machining

Fig. 10 After machining

い、図8と見比べると非常に満足できる加工が行われたことが分かる。また、表面粗さの測定結果を図11に示す。羽根根中央部での表面粗さは送り方向で108 nm($R_{\max}$)、ピックフィード方向で164 nm($R_{\max}$)であった。ピックフィード方向の表面粗さは期待していたほどの値が得られなかったが、約10 μm 周期の振動成分が見られ、カッターマークによるものではないことが分かる。これは装置全体に空気圧を供給しているコンプレッサの圧力変動によるものと思われる。また、総加工時間は約32時間であった。

図12に完成した羽根車を市販のモータに取り付けた様子を示す。このモータの本体の径は6.0 mm、軸径は0.7 mmである。加工した羽根形状はこのモータに取り付けることを前提に定義したために外径3.0 mmとしたが、本実験と同じ手法を用いて外径1.0 mm程度のものまで加工が可能である。

本実験の当面の目標は、実際に動作する1 mm³程度の大きさで表面が鏡面の部品を得ることであった。精密さゆえにピックフィードを小さくしていることが加工時間の増大の原因になってはいるものの、ほぼ目標に近い結果が得られた。しかし、本手法をマイクロマシン等の要素技術として適用することを考えた場合、工具の微細化や段取換えの際に工作物を精密にハンドリングできる装置の開発といった加工対象の微小化への対応が急務である。

4. 結 論

CAD データを利用した超精密フライス加工によって自由曲

Fig. 11 Measured surface roughness

Fig. 12 Propeller mounted to the motor

面を持つ微小部品の加工を試みた。実験の結果要求した形状と良好な表面性状を得ることができ、本手法の有効性と本手法による微小部品加工の可能性を確認した。

最後に、本研究に協力された電気通信大学卒研究生の兼平祐氏ならびに、ファナック(株)基礎技術研究所研究員の河合知彦、今井圭介、山本明氏に謝意を表す。また、本研究の一部は平成7年度科学研究費(試験研究 B 07555038)の補助のもとに行われたことを記す。

参 考 文 献

- 1) 梅田 章：マイクロマシン要素技術の動向，日本機械学会誌，**97**，905 (1994) 261.
- 2) 山口勝美，中本 剛：光造形法による形状創成，精密工学会誌，**61**，10 (1995) 1385.
- 3) 沢田 潔，竹内芳美，川北晋一郎，中沢久志，佐田登志夫：超精密旋盤を用いた3次元形状加工，日本機械学会論文集，**60**，577，C (1994) 2932.
- 4) 沢田 潔，竹内芳美，福島泰明，西江 真，佐田登志夫：旋盤形超精密フライス加工機による自由曲面のマイクロマシニング，日本機械学会論文集，**61**，581，C (1995) 293.
- 5) 沢田 潔，河合知彦，竹内芳美，佐田登志夫：超精密フライス加工による3次元マイクロマシニングの高度化，日本機械学会論文集，**61**，587，C (1995) 3129.
- 6) 竹内芳美，川北晋一郎，沢田 潔，佐田登志夫：超精密フライス加工の研究(自由曲面の加工)，日本機械学会論文集，**59**，566，C (1993) 3193.
- 7) Y. Takeuchi, M. Sakamoto, Y. Abe and R. Orita: Development of a Personal CAD/CAM System for Model Manufacture Based on Solid Modeling Techniques, Ann. CIRP, **38**, 1, (1989) 429.
- 8) 近藤 司，岸浪建史，斎藤勝政：逆オフセット法を基にした形状加工処理，精密工学会誌，**54**，9 (1988) 971.