超精密マイクロ溝加工の研究*
(V形状格子溝の製作)沢田 潔^{*1}, 河合 知彦^{*2}
竹内 芳美^{*3}, 佐田 登志夫^{*4}Development of Ultraprecision Micro Grooving
(Manufacture of V-Shaped Groove)Kiyoshi SAWADA, Tomohiko KAWAI,
Yoshimi TAKEUCHI and Toshio SATA

The study deals with the manufacture of microgrooves with sharp edges and smooth oblique and/or curved surfaces by means of an ultraprecision milling machine and single crystal diamond endmills. Fine microgrooves are key components to fabricate micrograting, micrograting lens and so on. Conventional groove fabrication methods such as etching and lithography are difficult to make grooves without burr. The new machining method proposed in the study allows to produce V-shaped grooves of 100 μm in pitch with enough shape accuracy and surface roughness of 48 nm (p-v value). The method also makes it possible to form the microgroove of 1 μm in pitch with sharp edge and without burr. In addition, the method is experimentally found effective to produce R-shaped groove and trapezoid-shaped one without burr.

Key Words: Micromachining, Ultraprecision Milling Machine, Diamond Endmill, Microgroove

1. 緒 言

超精密な形状精度, 面粗さが要求される光学機器部品や電子機器部品はもちろんのこと⁽¹⁾⁽²⁾, マイクロマシンに用いられるようなマイクロ部品の製造技術は⁽³⁾⁽⁴⁾, 二とおりに大別される。一つは現在の主流であるリソグラフィなど半導体製造技術を応用した加工技術であり⁽⁵⁾, 大量生産に向いている, マイクロ角溝の加工に対して L/D を大きくできるなどの利点がある。その反面, 加工材質が限られる, シャープなエッジを作りにくい, 斜面や曲面形状に対しては微小平面に細分化して階段状に 2.5 次元近似するため, 滑らかな面を得にくいといった欠点もある。他の一つは超精密加工機を用いた機械加工技術によるもので⁽⁶⁾, 切削, 研削, 放電などの加工を使っているが, 製品が型などで複製できない場合は大量生産に向かない, 高精度な工具が必要, マイクロ角溝の加工に対しては L/D の

大きな工具の製作が困難などの欠点がある。その反面, 加工材質をある程度選択できる, シャープなエッジを作りやすい, 斜面や曲面に対しても近似せずに滑らかな加工面が得られるなどの利点があり, 最近見直されている。

各種マイクロ形状の中でも, マイクロ回折格子やマイクログレーティングレンズなどへ応用ができるマイクロ V 溝, R 溝などのように斜面や曲面からなる溝形状に対しては, 半導体の製造技術を応用した加工技術を用いたものより機械加工の方が滑らかな面やシャープエッジを得やすいために光学的な効率面で有利であり⁽⁷⁾, 超精密切削加工への期待は大きい。

両手法とも一長一短があり, 互いに欠点を補いあって総合的に発展するのが望ましいが, 本報では超精密加工機と単結晶ダイヤモンド回転工具を用いた後者の手法を適用し⁽⁸⁾⁻⁽¹³⁾, 半導体の製造技術を応用した加工技術では加工が困難である滑らかな斜面形状や曲面形状をもつ超精密マイクロ溝加工試験を行い, その評価を行ったので報告する。

2. マイクロ溝の超精密切削加工

2.1 マイクロ溝の種類 基本的なマイクロ溝の形状は図 1 のように大きく分けて V 溝, 角溝, R 溝が

* 原稿受付 1997 年 12 月 26 日。

^{*1} 正員, ファナック(株) (☎ 401-0597 山梨県南都留郡忍野村忍草 3580)。^{*2} ファナック(株)。^{*3} 正員, 電気通信大学 (☎ 182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1)。^{*4} 正員, 豊田工業大学 (☎ 458 8511 名古屋市天白区久方 2-12-1)。

Fig. 1 Typical configuration of micro grooves

ある。図1(a)は回折格子などに应用される左右対称のV溝、図1(b)はフレネルレンズなどに应用される左右非対称のV溝、図1(c)はレンチキュラーレンズなどに应用されるR溝の例であり、溝全体は平面上に、あるいは曲面上など三次元面上に直線状、曲線状に加工される。このうち超精密切削加工が得意とするのは、工具製作の面で溝の大きさがダイヤモンドバイトチップの大きさに依存しないV溝とR溝である。ただしこの場合でも、V溝の角度が急しゅんで角溝に近い溝形状であったり、R溝のRが小さい場合は工具製作が困難になることに変わりはない。

2・2 回転工具によるマイクロ溝の加工方法

一般的にマイクロ溝の超精密切削加工方法には、溝が直線の場合はシェーパ加工、円周上にある場合は旋削加工が利用される。しかし、シェーパ加工は切削速度が遅いことや切り粉が連続的に排出されることなどから、溝エッジにバリが発生しやすかったり、加工開始と終了の部分にダレが生じたりする。旋削加工でも、工作物の回転中心付近では切削速度が遅くなり、溝エッジにバリが生じるなど切削が不安定になる。

そこで、溝形状に対応した一枚刃の単結晶ダイヤモンドバイトをシャンクに取付けた工具を用意し、それを高速回転させて安定した十分な切削速度を出すとともに、一刃当たりの除去量を少なくすることで、シェーパ加工や旋削加工の欠点を克服することを考えた。

回転工具によるマイクロ溝の加工方法は図2に示すように三つに大別され、それぞれ得失をもつ。工作物に対して工具回転軸が角度のついたもの図2(a)、(d)は、工作物の形状をある程度選択できる、V溝加工の場合は端面切削ができるため、バリの発生は少ないなどの利点がある。その反面、角溝の加工はできない、V溝の両斜面の加工条件が異なるなどの欠点がある。工具回転軸が平行なもの図2(b)、(e)は、V溝両斜面の加工条件を同じにできる、角溝の加工が可能

Fig. 2 Machining method of micro grooves

Fig. 3 Structure of ultraprecision machining center

という利点がある。その反面、工作物の形状が工具シャンク長さに制約される、V溝加工の場合には端面切削によるバリ取り効果が期待できないなどの弱点がある。工具回転軸が直角なもの図2(c)、(f)は、工作物の形状に限定されない、溝を直線だけでなく曲線など自由に加工できる、切削開始と終了時に工具振り回り径による干渉部分がないためにスポット的な溝加工が可能などの利点がある。その反面、工具回転中心部で切削速度が零になるのを回避させるため、刃先をオフセットさせる必要があり、完全なV溝、R溝の加工は困難という欠点がある。

本報では、V溝エッジのバリ発生低減と、高精度な形状転写を主眼におき、工作物に対して工具回転軸が角度のついた場合の加工を取上げる。

3. マイクロ溝の超精密切削加工システム

3・1 超精密加工機の概要 使用した加工機は、図3に示すように直線X、Z、Y、回転C、Bの同時五軸制御が可能なマイクロ加工用超精密マシニングセンタで、この他に工具を回転させる主軸として最高回転数100 000の静圧空気軸受構造のエアタービンが搭載

される。これらの軸を支持するベースは人工コンクリート内蔵の鋳鉄製で、空気+油減衰式振動遮蔽台の上に構成されている。各軸は、すべての滑動面が静圧空気軸受構造からなるスライド、ねじ、ナット、サーボモータなどで構成されており、スティックスリップの原因となる摩擦を完全になくしたサーボ系を実現している。最小分解能は直線 X, Z, Y 軸で 1 nm 、回転 C, B 軸で 0.0001 deg であり、モータに直結された 6400 万パルス/回転の分解能を有する光学式エンコーダのフィードバックによるセミクローズド制御方式を採用している。

3.2 単結晶ダイヤモンド回転工具 非鉄系の工作物を超精密切削加工するには単結晶ダイヤモンド工具が不可欠であるため、マイクロ溝加工用の回転工具にもこれを採用している。工具は、 $\phi 6\text{ mm}$ のシャンクに溝形状に合せて成形された単結晶ダイヤモンドバイトを、すくい面の高さをシャンクの中心に合せて取付けた構造である。バイトのすくい角は 0 deg 、逃げ角は 15 deg で、特に V 溝を加工する際に加工可能な溝の最小ピッチや溝底形状に影響するバイト刃先の曲率半径は $R50\text{ nm}$ 以下である。このような回転工具では、バイト単体の精度だけでなく、シャンクに対するバイトの各精度が重要となる。図4に開き角 90

Fig. 4 Single-crystal diamond tool for V-shaped grooving

Fig. 5 Appearance of diamond cutting edge

deg の V 溝加工用の工具形状を、図5に刃先の外観を示す。この場合は、すくい面①の二つの稜線②、③をそれぞれシャンクに直角、平行にナノメータ精度で成形する必要がある。

一般的にダイヤモンド工具メーカーでこのような回転工具の製作をすると、ダイヤモンドバイト部分の高精度な成型は比較的安定してできるが、そのシャンクに対する高精度なセッティングを安定して行うのは難しい。バイトの開き角を 90 deg に成型した図4のような形状の工具を複数本用意し、開き角度とバイトのシャンクに対する直角度の精度検査を行った。まず開き角度の精度検査は、無酸素銅製のワークに V 溝を試し加工してその角度を測定することにより行った。図6はその結果例で、この工具については $+0.05\text{ deg}$ 程度の誤差があることがわかる。その他の工具についても $\pm 0.05\text{ deg}$ 以内の誤差であり、バイト単体の精度はある程度安定していることがわかる。一方バイトのシャンクに対する直角度の精度検査は工具を工作

(a) Right side slope

(b) Left side slope

Fig. 6 Angle of machined V-shaped groove

Fig. 7 Setting error of cutting edge against the shank

物に対して直角にセットし、図2(c)のような角溝を試し加工してその底面の形状を測定することにより行った。図7はその結果例で、この工具については $+0.05\text{ deg}$ 程度の誤差があることがわかる。しかし、この工具は検査した中では良好なものであり、その他の工具については $\pm 0.5\text{ deg}$ 以内とばらついており、バイトのシャンクへの高精度なセッティングの安定化が困難であることがわかる。

バイトのシャンクに対する直角度誤差が図7のように正方向である場合は、これで図2(c)のような角溝を加工するとバイトの切れ刃で加工される領域の溝底形状は図7のように平面にはならないが、端面切削となるため表面粗さは理想的になる。また、バイトのオフセット径内はバイトの内側先端による点切削になり、同等の表面粗さを得るには1回転当たりの工具送り量を小さくしなければならない。逆に負方向であれば溝底形状は平面になるが、バイトの外側先端による点切削になり、良好な表面粗さを得るためには同様に1回転当たりの工具送り量を小さくしなければならない。

したがって本研究では、前述の工具の誤差の影響を受けにくい図2(a), (d)の加工方法によるV溝、R溝の加工をおもに取上げている。

4. V溝格子の加工

(ピッチ $100\text{ }\mu\text{m}$ オーダ、開き角 90°)

まず単結晶ダイヤモンド回転工具を用いたV溝の超精密切削加工の基本的な性能を確認するために、 $50\times 50\times 10\text{ mm}$ の真鍮製の加工物上面に計測が容易な開き角 90 deg のV溝格子をピッチを100, 200, 500 μm と変えて加工を行った。

4.1 加工条件 バイトの二つの稜線がシャンクに対して平行、直角である工具を加工物に対して 45 deg 傾けて加工を行う方法を採用したため、V溝の両斜面の理論面粗さは、端面切削面では影響は少ないが、外周切削面では工具振り出し径 R 、工具回転数 N 、工具送り速度 F に依存する。加工条件は式(1)で示されるこの理論面粗さ h が1 nm以下になるように決めている。

$$h = R^2 - \sqrt{R^2 - \left(\frac{F}{N}\right)^2} \dots\dots\dots (1)$$

回転数 70 000 rpm、工具送り速度 100 mm/min(粗加工時)、25 mm/min(仕上げ加工時)、切込み $15\text{ }\mu\text{m}$ (粗加工時)、 $2\text{ }\mu\text{m}$ (仕上げ加工時)で加工を行った。これらの制御軸は機械の直交3軸(X:工具送り、Z:ピッチ位置決め、Y:切込み)を用いた。また、送り方

(a) Pitch $100\text{ }\mu\text{m}$

(b) Pitch $200\text{ }\mu\text{m}$

(c) Pitch $500\text{ }\mu\text{m}$

Fig. 8 V-shaped groove of 90 deg with various pitches

(a) Width

(b) Depth

Fig. 9 Form accuracy of V-shaped groove

向の違いによる影響を考慮し、溝の加工方向は、アップカットの一方送り方式とした。ピッチ方向の位置決めは、外周切削面のエッジで発生した微少なバリを端面切削で除去する方向に〔図2(a)では右方向へ〕行う。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、加工液としてミスト状の白燈油を間欠的に加工物に吹き付けながら加工を実施した。

4.2 加工結果 図8(a), (b), (c)にそれぞれピッチ $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ の、 $500\mu\text{m}$ のV溝のSEM観察結果を示す。いずれも凹凸エッジはシャープで、バリはなく、斜面も滑らかな鏡面に加工されていることがわかる。

フォームタリサーフを用いて各溝の形状精度、表面粗さを測定した。図9にピッチ $100\mu\text{m}$ のV溝の形状精度を、図10にその表面粗さを示す。ピッチに関しては $100\mu\text{m}$ に対して $0.00 \sim 0.02\mu\text{m}$ の誤差、溝深さに関しては $50\mu\text{m}$ に対して $1.13\mu\text{m}$ の誤差、溝全体の傾きに関しては 45° に対して 0.07° の誤差となっており、良好な加工が行われていることが確認さ

れた。また、表面粗さに関しても、端面切削面、外周切削面ともに $R_{\text{max}} 48\text{nm}$ と良好な加工面となっている。

5. V溝格子の加工 (ピッチ $1\mu\text{m}$, 開き角 90°)

次にマイクロV溝の加工例としてピッチ $1\mu\text{m}$, 開き角 90° の加工を行った。工作物材質はジュラルミンに無電解ニッケルメッキを数 μm 施したもので、メッキ部分に溝を加工した。

5.1 加工条件 回転数 $50\,000\text{rpm}$, 工具送り速度 20mm/min , 切込み量 $1\mu\text{m}$ で加工を行った。送り方向は4章と同様にアップカットの一方送りとした。その他の条件は4章と同じである。

5.2 加工結果 図11はV溝部分のSEM観察結果である。ピッチが $1\mu\text{m}$ というマイクロV溝でも、バリのないシャープなエッジと、びびり痕などのない滑らかな斜面が得られている。また、図12にはV溝斜面のAFM解析結果を示す。微少領域ではあ

(a) Surface cut by face cutting edge

(b) Surface cut by side cutting edge

Fig. 10 Measured surface roughness

Fig. 11 V shaped groove of 90° with pitch of $1\mu\text{m}$

Fig. 12 Surface roughness of V-shaped groove by AFM

Fig. 13 Trapezoid-shaped groove of 36 deg with a pitch of 180 μm and plateau length of 40 μm

るが、ナノメータオーダの表面粗さが得られていることがわかる。

6. 各種マイクロ溝加工例

本加工法の特徴は、工具形状を変えることで任意のマイクロ溝の加工に対応できる点であるが、以下に各種のマイクロ溝に対する本加工法の適用例を示す。

6・1 台地残しのマイクロ台形溝 前述のV溝やR溝は一定ピッチで連続的に配置されているため、溝深さは工具の形状と溝ピッチのみによって決定され、切込み量の制御は特に必要ない。また、初期の工作物表面がうねっていても、仕上げ面にはその影響は現れない。しかし、マイクロ溝の中には溝同士が離れており、その間に平面台地部分をもつものもある。この場合は、まず平面(台地部分)を加工し、その後同一段取り(同一工具が望ましい)でV溝を切込み方向に正確に制御しながら加工をする。図13はピッチ180 μm 、台地幅40 μm 、開き角36 degで台地残しの台形溝を加工した例である。各エッジはシャープでバリがなく、各面は滑らかに加工されている。

6・2 マイクロR溝 バイトをR形状に成形することにより、R溝にも対応できる。ここでは、曲面をもつマイクロ溝の加工例としてR370 μm 、ピッチ200 μm のR溝格子の加工を取上げた。図14は加工結果をZYGO NEWVIEW 100にて形状測定した結果であるが、滑らかな曲面が良好に加工されていることがわかる。

7. 結 言

摩擦を完全に排除した超精密サーボ技術と、単結晶ダイヤモンド回転工具による高品質な高速切削技術を用いた超精密切削により、高精度なマイクロ溝形状の加工を行い、次のような結論を得た。

(1) 半導体製造技術を応用したエッチング加工では加工が困難なシャープな稜線と滑らかな斜面や曲面

Fig. 14 R-shaped groove with a pitch of 200 μm and a radius of 370 μm

をもつマイクロ溝格子を、バリがなく高精度に加工できる良質な加工方法を開発した。

(2) この方法を用いて100 μm オーダのV溝の加工を行い、形状精度、表面粗さともに良好な結果を得た。溝のエッジにバリはなく、両斜面ともに $R_{\text{max}}48\text{ nm}$ の表面粗さであった。

(3) さらにピッチ1 μm のマイクロV溝の加工を行い、このような超微細形状に対しても、エッジはバリがなくシャープで、斜面は滑らかな加工面が得られた。

(4) 台形溝やR溝など、その他の形状に対しても、同様の加工方法で、良好な加工が可能であることを示した。

本研究を進めるにあたり協力していただいた電気通信大学大学院生の酒井田康宏、卒研究生のナツポン・ソンスイツ、平林智則に、またファナック(株)の今井圭介、山本明、尾高俊一、平井俊雄、中村文信、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、科学研究費(基盤研究B09555040)の補助の下に行われるとともに、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の研究開発」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、ファナック(株)で実施したことを付記する。

文 献

- (1) 薄木雅雄, ポリゴンミラーの超精密切削, オプトメカトロニクス時代の超精密切削技術, 日本オプトメカトロニクス協会, (1991), 72-83.
- (2) 田中克敏, 最新の超精密加工技術, 日本機械学会東海支部第41回総会講演, No. 293-1(1992), 9-12.
- (3) 藤田博之, マイクロマシンの世界, 工業調査会, (1992), 13-29.
- (4) 増沢隆久, マイクロマシニングの研究と手法, 精密工学会誌, 60-1(1994), 13-15.

- (5) 佐藤一雄, 単結晶シリコンの異方性エッチング技術, 精密工学会誌, **53**-6(1987), 849-852.
 - (6) 上田勝亘, ダイヤモンド工具による微細溝加工, 精機学会春季大会学術講演会講演論文集, (1986), 869-870.
 - (7) Blough, G. and Morris, G. M., *Hybrid lenses offer high performance at low cost, Laser Focus World*, (1995), 1-4, Penn Well Publishing Company.
 - (8) 竹内芳美・加藤和弥・沢田潔・佐田登志夫, 超精密フライス加工の研究(加工機の構成と加工結果), 機論, **58**-554, C(1992), 3116-3122.
 - (9) 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), 機論, **59**-566, C(1993), 3193-3198.
 - (10) 沢田潔・川北晋一郎・中沢久志・竹内芳美・佐田登志夫, 超精密旋盤を用いた3次元形状加工, 機論, **60**-577, C(1994), 2932-2937.
 - (11) 沢田潔・竹内芳美・福島泰明・佐田登志夫, 旋盤型超精密フライス加工機による3次元マイクロマシニング, 機論, **61**-581, C(1995), 293-298.
 - (12) 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, 機論, **61**-587, C(1995), 3129-3135.
 - (13) 沢田潔・山本明・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(第2報, 工具系の高精度化), 機論, **63**-614, C(1997), 3634-3640.
-