超精密マイクロV形止り溝の創成*

室田真弘** 鈴木宜暁*** 石田 徹† 竹内芳美† 河合知彦†† 沢田 潔††

Creation of Ultraprecision V-shaped Micro Grooves with Flat-end

Masahiro MUROTA, Takaaki SUZUMURA, Tohru ISHIDA, Yoshimi TAKEUCHI,
Tomohiko KAWAI and Kiyoshi SAWADA

The study deals with the creation of V-shaped microgrooves with flat-end. Microgrooves with flat-end play an important role in case of generating intermittent grooves. Microgrooves by use of a rotational V-shaped cutting tool have a long circular arc slope with a large radius when stopping on the way. Thus, a non-rotational V-shaped cutting tool is employed, however, a slope is still formed at the end point of the microgroove. In the study, two new cutting methods are devised so that the V-shaped microgrooves with flat-end can be created. The first method makes use of chip generation whose shape is straight under some cutting condition. The non-rotational cutting tool presses the chips generated perpendicularly against the V-shaped microgroove and cuts the excessive parts of chips over the plane. The second one is to stick the non-rotational V-shaped cutting tool perpendicular to the workpiece surface, to feed it backwards and to remove the swelled parts by feed it to the reverse direction. From experimental results, it is found that the methods enable the creation of flat-end microgrooves.

Key words: ultraprecision V-shaped microgroove, flat-end, non-rotational diamond tool

1. 序 論

印刷や光学機器に使用される部品の形状や精度には、製品の品質や性能の向上および新機能の付与を達成するため、さらなる複雑化、精密化が求められている。これに伴い、これらの部品の生産に不可欠な金型の加工法にも、高度化する要求を満たすことが強く望まれている。その具体例のひとつに、光カードや紙幣などを対象とした高度印刷技術への応用が期待されているマイクロ両端止り溝形状の創成法がある。

マイクロ両端止り溝の典型例を図1に示す。この図に示すように、マイクロ両端止り溝とは溝の終端部に切上りを全くもたないマイクロ溝形状である。このような終端部の形状を止り溝と呼ぶこととする。終端部が止り溝形状のマイクロ溝は、今までのマイクロ切削加工では形成できなかった。従来の切削によるマイクロ溝加工では、バリやダレのない高い形状精度の達成と面粗さなどの加工面性状の向上を目的として、高い切削速度が比較的容易に得られる回転工具を用いた切削、すなわち、フライカット方式による切削によってマイクロ溝を加工するのが一般的である^{1)~3)}。切れ刃の回転半径を大きくすれば、切削速度の増加は容易であるが、溝の深さに対する工具回転半径の割合が大きくなり、図2(a)に示すように、溝の終端部には非常に長い切上りが生じてしまうことになる。

Fig.1 Various kinds of flat-end V-shaped microgroove

* 原稿受付 平成15年8月15日

** 学生会員 電気通信大学(東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)
(現、ファナック(株); 山梨県忍野村)

*** 学生会員 電気通信大学大学院

† 正会員 大阪大学大学院(大阪府吹田市山田丘2-1)

†† 正会員 ファナック(株)(山梨県忍野村)

この問題を解消するため、図2(b)に示すような非回転工具によるマイクロ溝加工法を開発した。この方法によってマイクロ溝を加工することにより、自由度の高いマイクロ溝形状を加工することができ、さらに、図3に示すような工具経路を採用することにより、切上りを大幅に減少させることができた⁴⁾⁵⁾。しかし、この方法を用いても、切上りを皆無にすることは不可能であり、完全なマイクロ止り溝の創成法の確立には至っていない。

そこで本研究では、マイクロ両端止り溝の創成を最終目的とし、その第一段階として、マイクロ溝の一端を非回転工具を用いて止り溝形状とする加工法について2種類考案した。具体的には、マイクロ溝加工時に、その終端部に生成された切りくずを意図的に残留、集積させ、それを除去することによって止り溝形状を得る方法、および、工具を被削材に押し

Fig.2 Microgrooving with rotational and non-rotational cutting tool

Fig.3 Machining of V-shaped microgroove with non-rotational tool

Fig.4 Ultraprecision machining center and setting of tool and workpiece

付け、工具形状を転写させることによって止り溝形状を得る方法である。これらの方法により、マイクロ両端止り溝の終端部形状の加工を試みた結果、目的形状の創成を実現したので報告する。

2. 超精密加工機と工具およびマイクロ溝加工法

マイクロ溝の加工実験には、超精密加工機 ROBO nano Ui (FANUC 株式会社製) を用いた。その構造を図 4(a) に示す。本加工機は、摩擦なしサーボ機構の思想に基づき設計され、全可動軸は静圧空気軸受で支持されている。可動軸数は直進 3 軸、回転 2 軸の合計 5 軸を装備し、各軸の最小分解能は直進 X, Y, Z 軸で 1.0nm, 回転 B, C 軸で 0.00001° である⁶⁾。

非回転工具と被削材の位置関係を図 4(b) に示す。工具はジグに装着された状態で C テーブル上に固定されており、一方、被削材は B テーブル上にジグを介して設置されている。工具の切れ刃先端は C テーブルの回転軸上に位置決めされている。

使用する非回転工具は、極めて小さいノーズ半径をもつ開き角 90° の単結晶ダイヤモンド工具である。本加工機の各軸を用いて、この非回転工具を被削材に対して垂直に切り込み、送ることによって、マイクロ溝を加工する。したがって、加工される溝の断面は、2 つの斜面が 90° をなす二等辺 V 字形状となる。溝加工時には、各軸を制御することにより、工具の姿勢と経路、切込み、送り速度を高い自由度で設定することができる。特に、5 軸を装備しているため、工具の姿勢を被削材に対して変化させなければならない複数の加工工程を段取り替えになしに行うことが可能であり、段取り替えに起因する加工誤差を抑制できる。なお、加工実験には、被削材として、無酸素銅および銅メッキを用いた。

3. 切りくずを利用した止り溝形状の創成

3.1 加工手順

本手法による止り溝形状の加工手順を図 5 に示す。この手法を切りくず利用止り溝創成法と名づけ、以下に説明する。はじめに、工具を 45° 傾け、片方の切れ刃を被削材上面に対して水平にし、被削材に平面を加工することによって、基準となる平面を生成する。次に、工具の姿勢を基準面に垂直な姿勢に戻し、ある切込みで切削する。これにより、工具の運動

Fig.5 Flat-end microgroove machining method by means of generated chips

Table 1 Cutting condition

Workpiece material	Oxygen-free copper
Rank angle	0°
Depth of cut	0.25 μm, 0.5 μm
Feed speed	40 mm/min
Cutting fluid	Kerosene

軌跡が転写されたマイクロ V 形溝が加工される。このとき、溝の終端部では、工具を切り抜かずによりくずを残すように止め、加工してきた切削方向とは逆の斜め上方に工具を抜く。

このような加工を溝の深さが目標値に達するまで一定の切込みで繰り返す。ただし、切りくずを溝終端部で隙間なく整列させるため、図 5 に示すように、切り込むごとに切りくず厚さ分だけ工具経路を短くし、溝終端部に切りくずの束を生成させる。また、この溝加工は、工具すくい角 0° で行っているため、溝終端部の形状は止り溝のそれとなる。

最後に、再び工具を 45° 傾け、溝終端部に発生した切りくずの束を切断するように除去する。これにより、マイクロ V 形止り溝形状を完成させる。この切りくず処理方法を積層切りくず切断除去方式と呼ぶこととする。

3.2 適切な切りくず形態の生成条件

前節で述べたように、本手法によるマイクロ止り溝の加工においては、切りくずの形態が非常に重要になる。そこで、止り溝形状の形成に適した切りくずを発生させるための条件を検討した。加工条件としては、非回転工具によるマイクロ V 形溝加工に関する研究結果に基づいて設定した。その加工条件を表 1 に示す。なお、目標とする溝深さを 10 μm とした。

まず、切りくずの形態について注目した。図 6 は、切込み 0.25 μm の条件下における溝深さに対する切りくず形態の変化を示している。その結果、溝深さが 3 ~ 5 μm までは、図 6(a) に示すように、せん断型の切りくずが発生するが、溝深さが深くなるにつれて、図 6(b) に示すように、流れ型の切りくずに移行しはじめ、さらに溝深さが深くなると、図 6(c) に示すように、完全に流れ型の切りくずとなり、以後、溝終端部は流れ型の切りくずで覆われていった。この現象は、切込みが

Fig.6 Groove depth and chip shape type in case of depth of cut $0.25\mu\text{m}$

Fig.7 Enlarged view of chip bottom on microgroove side

$0.5\mu\text{m}$ のときも同様に生じたが、切りくずがせん断型から流れ型に移行しはじめるときの溝深さは約 $15\mu\text{m}$ であった。

溝深さが目標値である $10\mu\text{m}$ に達した際の溝終端部における切りくずの裏側の形態を図 7 に示す。図 7(a), (b) の違いは切込みの違いであり、それぞれ切込みが $0.25\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$ の場合である。前者では、切りくずが流れ型に移行した後であり、その厚さは非常に薄く、図 7(a) に示すように、切りくず自体がよれてシワになった状態で押し付けられているのがわかる。一方、後者では、切りくずが流れ型に移行する前のせん断型で、その厚さはある程度の厚さを維持しており、図 7(b) に示すように、切りくずの裏側が平面をなしているのがわかる。このように、せん断型の切りくずは溝終端部に垂直な平面形状を生成するため、止り溝の形成に適しているが、流れ型の切りくずでは、それが難しく、止り溝の形成に適していない。

溝終端部における切りくず裏面の形態に違いが生じるのは、以下の理由によるものと推測している。後者の場合は、切削時のせん断角が小さく、切削抵抗が増加し、これによって切りくずが工具すくい面上で押しつぶされるような塑性変形を加えられながら生成されていくため、工具すくい面の形状が切りくず裏面に転写されたことによるものと考えている⁴⁾。また、前者の場合は、切削時のせん断角が大きく、切削抵抗は小さくなるので、切りくずは薄くなり、工具すくい面上で切りくずが押しつぶされることもないことによるものと思われる。

次に、溝終端部におけるせん断型切りくずの配置について注目した。想定される配置を図 8 に示す。図 8(a) は切りくずの間に隙間がある場合、図 8(b) は切りくずが接しながら並んでいる場合、図 8(c) は切りくずが押し込まれている場合である。止り溝形状を得るためには、図 8(b) に示した配置が適していると考えた。これは、切りくずを切断して止り溝形状を得る際に、図 8(a) の状態であると、切りくず間の隙間が大きく、切りくずの切断面が構成する平面に多数の大きな亀裂がそのまま残留すると考え、また、図 8(c) の状態であると、切りくずの根元周辺が圧縮され、材料組織が周囲と異なる領域をさらに大きくしてしまうと考えたためである。

切りくずがどの配置になるかは、工具を停止させる位置と切りくずの厚さによって決定される。図 8(b) に示した切りくずの配置にするためには、工具を切り込み、溝を切削するご

Fig.8 Tool position and chip generation at microgroove end

Fig.9 Actual chip generation according to tool position

とに、言い換えれば、切りくずを出すごとに、切りくずの厚さ分だけ工具を送る距離を短くすればよい。すなわち、切りくず厚さと溝加工時の工具経路の短縮距離が等しくなる条件を求めればよい。切りくず厚さは切込みとせん断角により決まるが、せん断角は被削材の物性、切削速度、切込み、切削油、その他の様々な条件の組合せによって変化する。そのため、固定できる加工条件は固定したうえで、図 8(b) に示す切りくず配置を実現する条件を実験的に求めることにした。この加工実験は、工具経路の短縮距離を様々に変化させ、溝終端部に生成した切りくずの配置を観察することにより行った。なお、固定した加工条件は、切込み $0.5\mu\text{m}$ とした以外は表 1 に示した値に設定した。

図 9 に加工実験で得られた切りくずの配置を示す。切りくずの下部を比較すると、図 9(a) では切りくず間に隙間が生じ、図 9(c) では切りくず間が圧縮されているが、図 9(b) では切りくずがほぼ接していることがわかる。このときの条件は、切りくずを出すごとの工具経路の短縮距離が切込みの 1.5 倍としたときであった。すなわち、切りくず厚さは切込みの 1.5 倍の約 $0.75\mu\text{m}$ 、せん断角は約 34° 程度であったと考えられる。

3.3 積層切りくず切断除去方式による切りくず処理

図 7(b) に示した溝終端部形状と図 9(b) に示した切りくず配置が得られたので、これを用いて止り溝加工の最終工程である切りくずの切断除去を行った。方法は図 5 で説明した積層切りくず切断除去方式である。このとき、切りくずおよび稜線上に生じる可能性のあるダレを防止するために、 $0.6\mu\text{m}$ の切込みを加え、送り速度 40mm/min で切りくずを切断除去した。

図 10 に加工したマイクロ V 形止り溝を示す。図 10(a) に示すように、溝部および溝終端部の稜線がダレのないシャープ

Fig.10 Generated flat-end V-shaped microgroove by means of chips

Fig.11 Surface roughness of flat-end V-shaped microgroove

なエッジが構成されているのがわかる。また、図 10(b)は図 10(a)に示した領域Aを上方から観察したものである。切りくずが接しているとはいえ、切りくず間のわずかな隙間によって層状の亀裂が、切りくずの断面が構成する平面の全領域で生じるものと考えていたが、この図から、この領域の大半において、被削材が切削時に塑性変形をうけ、切りくずの隙間を埋めるように挙動し、平面が形成されているのがわかる。

図 11に加工したマイクロV形止り溝の溝表面および領域Aの面粗さを示す。両者の面粗さはそれぞれPV値で24nmおよび10nmであった。特に、領域Aの面粗さは溝周辺の面粗さと同等であった。

3.4 一体化切りくず切断除去方式による切りくず処理

前節までの止り溝形状の加工では、溝終端部に接するように配置した束状の切りくずを切断除去する際、材料の塑性変形によって平面を形成できたものの、層状の亀裂を皆無にすることができなかった。これは、せん断型の切りくずの厚さを厳密に一定にはできないこと、また、せん断型の切りくずの表側の形態はせん断変形の影響を受けてギザギザした不安定な面形状になることにより、切りくずを近接させ、材料の塑性変形による平面の形成があったとしても、層状の亀裂を全く無くすることは困難と思われる。

そこで、図 12に示すように、溝終端部に配置した切りくず全体を1つの大きな切りくずとして切削し、被削材から切断除去することで、止り溝形状を得る加工法を試みた。この切りくず処理方法を一体化切りくず切断除去方式と呼ぶこととする。切りくず全体を1つの大きな切りくずとする工程の切削条件は、切込み10μm、送り速度40mm/minと設定し、溝終端面から20μm切削した位置で工具を停止させた。ここで、当然のことであるが、この工程における切込みは溝深さに等し

Fig.12 Another chip removing method

Fig.13 Machined flat-end V-shaped microgroove

くなる。また、これ以外の工程は図5に示した工程と同じである。

この加工法で形成したマイクロV形止り溝を図 13に示す。溝終端部にあった切りくずによる層状の亀裂部分はほぼ取り除かれているのがわかる。ただし、溝終端部の上面中央にわずかに層状の亀裂が残留しているが、切削距離が束状の切りくずの幅に対して不足していたことによって、切りくず全体を完全な一つの切りくずとできなかったためである。これは、切込み10μmのマイクロ溝加工におけるせん断角が、予想より大きく、一つの大きな切りくずの厚さが薄かったためであると推測している。したがって、溝終端面から切削する距離を延長することにより、残留してしまった層状の亀裂を容易に除去することができると考えている。

このような加工法を用いることにより、問題となった溝終端部における層状の切りくず跡を除去できる可能性は高いが、10μmという切込みは非回転工具によるマイクロ溝加工には厳しい切削条件であるため、図13からもわかるように、稜線のシャープさや溝の斜面および溝終端部の上面の面粗さも低下した。これは、最後に大きな切りくずを生成する際に、被削材が工具によって圧縮されたために塑性変形を生じ、被削材の均一性が失われたことによるものと思われる。

4. 工具の形状転写と逆送りによる止り溝の創成

前章の加工法では、全工程が切削加工で行われ、可能なかぎり材料を塑性変形させることなく、止り溝形状を創成できたものの、切りくずによる層状の亀裂が潜在的に残留するという問題があった。これを除去しながら止り溝形状を得ることも可能であったが、材料に塑性変形と表面性状の悪化を招いた。そこで、本章では、全く視点を変え、材料の塑性変形を積極的に活用し、止り溝形状を創成する手法を考案したの

Fig.14 Flat-end microgroove machining with reverse feed method

Fig.15 Indentation of non-rotational diamond tool

で、これについて説明する。

4.1 加工手順

本手法による加工手順を図14に示す。工具は前章で使用したものと同一であり、基準面を加工するまでは同じ手順である。次に、工具を元の姿勢に戻し、被削材に対し垂直に押し込んだ後、通常の切削方向とは逆方向に、すなわち工具逃げ面の方向に工具を送ることによって、工具の形状を転写し、マイクロV形溝を形成する。この際、溝は切削ではなく塑性変形によって創成される。同時に、塑性変形であるので、溝の周囲に材料の盛り上がりが生じる。また、工具すくい角は 0° であるので、溝終端部の形状は止り溝のそれとなる。最後に、再度工具を 45° 傾け、溝周囲の材料の盛り up を切削することにより除去する。これにより、マイクロV形止り溝の終端部形状を完成させる。この手法を工具形状転写逆引止り溝創成法と名づける。

4.2 基礎実験

本手法を行う前に、工具形状が正確に転写され、止り溝形状が創成されるか確認するための基礎実験を行った。その手順を図15に示す。基準面を形成し、工具を被削材に垂直に押し込むまでは同じ手順であるが、次に、工具を送ることなく、そのまま離脱させる。これにより、工具形状が転写された圧痕が生じる。ここで、工具の押込みにより圧痕の周囲には、塑性変形による材料の盛り上がりが生じる。最後に、工具を 45° 傾け、圧痕の周囲に生じた盛り up を切削により除去する。この加工実験では、被削材を無酸素銅と銅メッキとし、押し込む際の送り速度を 0.01mm/min に、押込み深さを $5\mu\text{m}$ から $25\mu\text{m}$ まで

(a) After indentation

(b) After removal of swelled part

Fig.16 Indented workpiece surface (oxygen-free copper)

(a) After indentation

(b) After removal of swelled part

Fig.17 Indented workpiece surface (copper plating)

Fig.18 Surface profile and roughness of impression on copper plating

$5\mu\text{m}$ 刻みに変えた値に設定し、工具を押し込んだ。また、盛り up を除去する加工条件は、切込み $0.6\mu\text{m}$ 、送り速度 40mm/min とした。加工中は、切削油として白灯油を使用した。

押込み深さ $25\mu\text{m}$ のときの無酸素銅および銅メッキの加工結果をそれぞれ図16、17に示す。各図の(a)、(b)は、それぞれ工具の押込みおよび離脱後、塑性変形による盛り up の除去

後を示している。これらの図に示すように、工具形状が転写され、止り溝形状が創成されていることがわかる。また、図16(a), 17(a)から、工具逃げ面側に塑性変形による被削材の盛り上がりが多く、工具すくい面側には少ないこと、図16(b), 17(b)から、圧痕周辺の盛り上りを除去すると、多少のダレはあるものの、おおむねシャープな稜線が得られていることがわかる。また、押込み深さが他の値のときでもこれらの傾向は変わらなかった。

図17(b)に示した銅メッキの圧痕斜面の面性状を測定した。その結果を図18に示す。図18(a)は圧痕の片側斜面の3次元形状を、図18(b)は図18(a)に示した白い点線上の形状を示している。これらの結果から、圧痕斜面に150 μm の測定距離に対し、高さ270nmの変形を確認された。これは、工具逃げ面の形状が転写されたのではなく、被削材の塑性による形状変化であると思われる。測定装置の限界により、止り溝終端面にあたる圧痕を構成する平面を直接測定できなかったが、この平面にも同様の変形が同じ割合で現れていると考えられる。したがって、これ以上の平面度を実現しなければならない場合には、なんらかの対策が必要となる。例えば、本加工実験では、目標の押込み深さまで工具を押し込んだ直後に工具を引き上げていたが、工具を目標の押込み深さで一定時間停止させる、あるいは、小さな押込みを繰り返すことにより、被削材の形状変化を抑制できるのではないと思われる。

また、図18(c)は図18(a)に示した白い点線上の面粗さを示している。この図に示すように、PV値で5nmという面粗さが得られており、面粗さに関しては問題はなかった。

4.3 止り溝形状の加工実験

基礎実験により、本手法によって止り溝形状が形成できることがわかったので、図14に示したように、工具を押し込み、工具逃げ面方向に工具を送ることを繰り返し、マイクロV形止り溝形状を創成する。本加工実験における加工条件は、工具押込み時の送り速度1mm/min、押込み深さすなわち溝形成時の切込み0.1 μm 、溝加工時の送り速度4mm/minとし、目標とする溝の深さと長さをそれぞれ10 μm 、400 μm と設定した。また、溝の周囲に生じる塑性変形した被削材の盛り上りを除去する際の加工条件は、送り速度40mm/min、切込み0.6 μm とした。加工時には、切削油として白灯油を用いた。

本加工法を用いて無酸素銅および銅メッキに形成したマイクロV形止り溝をそれぞれ図19(a), (b)に示す。無酸素銅では、図19(a)に示すように、溝終端部の稜線にダレが見られたが、溝部の稜線にはダレは少なかった。この差は、溝の周囲に生じた盛り上りを除去する際の工具の送り方向と両稜線の向きの差が原因であると思われる。すなわち、溝終端部の稜線は工具の送り方向と直角となるが、溝部の稜線は平行になる。また、銅メッキでは、図19(b)に示すように、全ての稜線においてダレが認められず、良好なマイクロV形止り溝を得ることができた。

Fig.19 Machined flat-end V-shaped microgroove with reverse feed method

5. 結 論

切削加工によるマイクロ溝加工では、回転工具が用いられることが一般的であったが、回転工具では、溝深さに対して非常に長い切上りを溝終端部に生じさせざるを得なかった。そこで本研究では、非回転工具を用いて、溝終端部に全く切上りの生じないマイクロ止り溝形状の加工法を2種類考案した。これらの加工法を実際に適用した加工実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 切りくずを溝終端部に接するように配置し、それを切断、除去する第一の方法により、マイクロV形止り溝を創成できることを示した。
- (2) 工具を垂直に押し込み、切れ刃の逆方向に工具を送り、止り溝形状とV形溝を形成し、溝周囲の盛り上りを切除するという第二の方法により、マイクロV形止り溝を形成できる可能性を確認した。

今後は、マイクロ両端止り溝や溝形状が曲線状となるような複雑な形状をしたマイクロ止り溝を創成するなど、実用化に向けた研究を行っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 沢田 潔, 河合知彦, 竹内芳美, 佐田登志夫: 超精密マイクロ溝加工の研究 (V形状格子溝の製作), 日本機械学会論文集 (C編), **64**, 627 (1998) 4440.
- 2) K. Sawada, S. Odaka, T. Kawai, T. Hirai, Y. Takeuchi and T. Sata: Manufacture of Diffraction Grating on Tiny Parts by Means of Ultraprecision Milling, *Microsystem Technologies*, Springer-Verlag, **5** (1999) 157.
- 3) 森田晋也, 石川惣一, 鈴木 亨, 上原嘉宏, 片平和俊, 林 偉民, 大森 整, 竹内芳美: サブミクロンV溝の超精密マイクロ切削, 2003年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2003) 356.
- 4) 前田真児, 竹内芳美, 沢田 潔, 河合知彦, 佐田登志夫: 非回転工具を用いた超精密マイクロ溝の創成, 精密工学会誌, **66**, 9 (2000) 1456.
- 5) 前田真児, 竹内芳美, 沢田 潔, 河合知彦, 佐田登志夫: 非回転工具による多焦点マイクロフレネルレンズ加工, 精密工学会誌, **67**, 9 (2001) 1463.
- 6) 沢田 潔, 竹内芳美: 超精密マシニングセンタとマイクロ加工, 日刊工業新聞社 (1998).