

チャンファ付きダイヤモンド工具による高硬度材への複雑形状創成

竹内 芳美

唐 辛鋭 (大阪大学), 中本圭一 (東京農工大学), 小島一志 (アライドダイヤモンド)

セラミックスや超硬合金などの金型材料を加工する場合、工具摩耗が激しくなり、摩耗した工具形状が加工面に転写され、高精度な加工が困難となる。本研究では、特殊チャンファ付きダイヤモンド工具を用い、高精度加工と工具摩耗の抑制を同時に実現できる刃先移動加工法を提案する。この刃先移動加工法を曲面加工に適用し、高精度な曲面の創成を実現できた。

1. はじめに

近年、各種情報機器の高性能化・小型化に伴い、それらを支える基幹部品である光学素子に対して、高精度化・高機能化が要求されている。このような光学素子は、金型で成形して量産されるため、特にその金型には高精度化の要求が高まっている。

レンズの素材として、プラスチックは低コストと低成形温度というメリットをもっているため多用されてきたが、近年では、優れた光学特性をもつガラスの使用が増えている。しかし、ガラスの成形温度は高く、それに耐えうる金型が必要になる。この高硬度かつ耐熱性のある金型材料として、超硬合金やセラミックスなどの硬脆材料が挙げられるが、その切削には激しい工具摩耗が発生し、摩耗した工具形状が加工面に転写され、高精度な加工を長時間継続することは難しい。

そこで、特殊チャンファ付き非回転 R バイトを使用し、工具摩耗を抑制できる刃先移動加工法をすでに提案した¹⁾²⁾。本研究では、この刃先移動加工法を曲面加工に適用し、高精度な曲面の創成を実現したので報告する。

2. 超精密加工機と使用工具

本研究では超精密加工機 FUNUC 製 ROBO nano を使用した。この加工機は X, Y, Z の並進軸 3 軸, B, C の回転軸 2 軸の同時 5 軸制御加工が行える。各軸の最小分解能は並進軸で 1.0 nm, 回転軸で 1×10^{-5} deg である。

また、使用した工具は、先端部半径が 0.1 mm の R バイトの単結晶ダイヤモンド製工具 (株式会社アライドダイヤモンド製超精密切削工具「UPC」) である。この工具は、図 1 に示すように特殊チャンファ³⁾が付いているため、切れ刃に沿って垂直断面の角度が一定となるすくい角を有する。さらに、円弧状の切れ刃形状のため、従来のチャンファ付き工具を使用する際に問題になる形状誤差を改善できる。チャンファの幅は 2~5 μm 程度である。硬脆材料の加工では、脆性破壊を抑えるため、一般に切込み深さは数百 nm 程度であるが、特殊チャンファ付き工具を用いる加工では、チャンファの部分だけを使用するため、チャンファの角度が負のすくい角になる。硬脆材料を加工する際には、負のすくい角を用いることにより臨界切

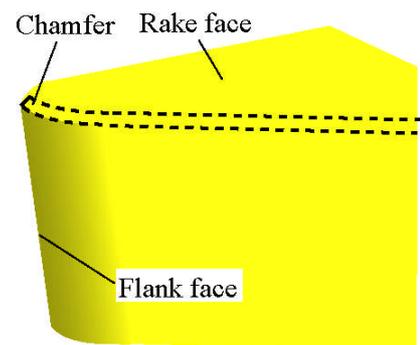


Fig.1 Tool with special chamfer

込み深さを大きく設定できることが知られており⁴⁾⁻⁶⁾、これまでの研究結果から、チャンファの角度は-30 deg を選択した¹⁾⁷⁾。

3. 刃先移動加工法の概要

従来の円弧断面の溝加工では、良好な表面を得るために、工具は同一姿勢をできる限り保持しながら加工を行っている。このとき、工具は切れ刃の一部のみを使用して加工するため、工具摩耗はこの部分に集中する。この問題を解決するために、刃先移動加工法を提案した¹⁾。刃先移動加工法では、図2に示すように工具を常に進行方向と垂直な面内に回転させながら加工を行う加工法である。切削点は切れ刃上を常に移動し、切れ刃の広い領域を使って加工するため、工具摩耗を抑制することが期待できる。

焼結 SiC(新日鉄マテリアルズ株式会社 C101R) での加工実験で刃先移動加工法の検証を行った。従来の溝加工法を用いた場合には、加工距離が 2,240 mm において、刃先の中心部分に激しい摩耗が発生し、この摩耗によりすくい面内に 8 μm 程度の工具破損が見られた。一方、刃先移動加工法では、加工距離が 2 倍の 4,480 mm において、工具のチャンファ部分に僅かな刃先後退が発生したが、摩耗による工具の破損は見られなかった。

また、刃先移動加工法の効果について考察を行った²⁾。刃先移動加工法を用いる際に、工具を回転させながら送ることにより、送り方向の切削力が小さくなるため、工具摩耗の低減に繋がる。その上で、工具切れ刃の広い領域を使用することで、工具摩耗を平均化させることになり、工具摩耗がさらに低減できたと考えられる。

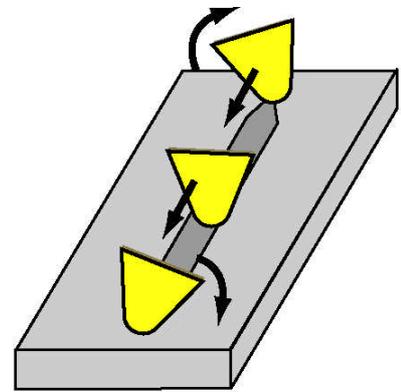


Fig.2 Cutting point swivel machining

4. 曲面加工

4.1 曲面加工への適用

従来の曲面加工において、ボールエンドミルなどの回転工具は多用されてきたが、非回転工具を利用することにより、回転工具が実現できない表面粗さを得られている⁸⁾。また、R バイトを用い、非球面形状のシェーパー加工を行って、良好な表面粗さや形状精度も得られている⁹⁾。

そこで、シェーパー加工を用いた刃先移動加工法を曲面加工に適用した。Z 方向を送り方向、X 方向をピックフィード方向とする。曲面加工のアルゴリズムを図3に示す。高硬度材料の仕上げ加工を想定し、常に臨界切込み深さ以下の切込みで加工を行う。

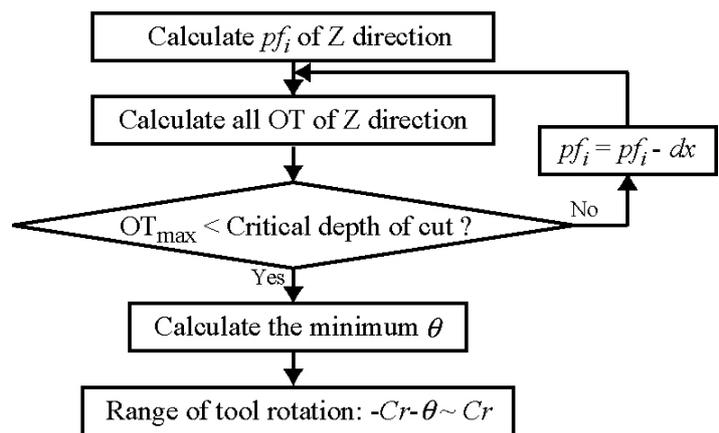


Fig.3 Algorithm for applying to surface machining

3に示す。高硬度材料の仕上げ加工を想定し、常に臨界切込み深さ以下の切込みで加工を行う。

ここではまず、X 方向のピックフィードを計算する。X 方向の n+1 パス目を加工する際に、Z 方向の i 番目の加工点における XY 平面の断面図を図4に示す。点線は n+1 パス目の除去形状である。ここで、X 方向のピックフィードを pf_i 、n パス目の加工深さを h_n 、n+1 パス目の加工深さを h_{n+1} 、線

分 PQ と X 軸の角度を θ_i とする。まず、線分 OQ の長さが臨界切込み深さ以下になるように、ピックフィード量 pf_i を設定する。そして、線分 OT の長さ L_i を計算し、切込み深さと比較する。Z 方向のすべての点における L_i が切込み深さより小さくなるまで、ピックフィード量 pf を小さくする。

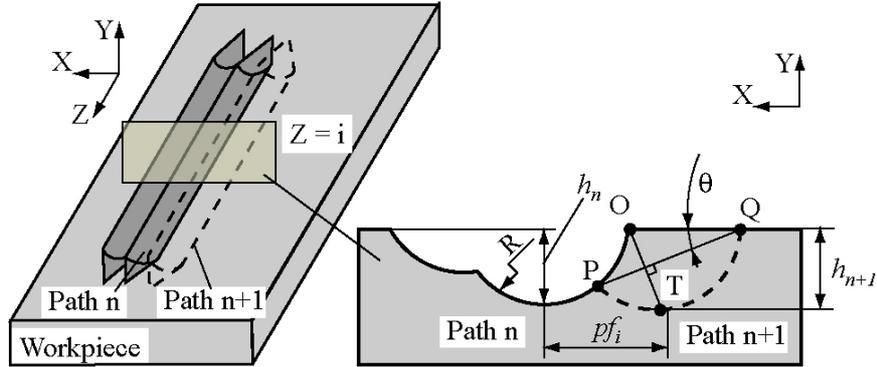


Fig.4 Calculation of pick feed

$$L_i = \frac{a \tan \theta + b - \sqrt{(a \tan \theta + b)^2 - (1 - \tan \theta)(a^2 - b^2 - R^2)}}{\cos \theta (1 + \tan^2 \theta)} \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{cases} a = \sqrt{R^2 - (R - h_n)^2} - pf_i \\ b = R - h_{n+1} \end{cases} \quad (2)$$

次に、工具の回転可能範囲を計算する。工具の円弧以外の部分と被削材の間に干渉が生じない工具回転可能範囲を C_r とすると、図 4 に示すように、 $n+1$ パス目を加工する際に、工具の回転可能範囲が $(-C_r - \theta \sim C_r)$ になる。ここで、角度 θ は式(5)から計算できる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{e^2 - 4dg} - c}{2d\sqrt{R^2 - (R - h_n)^2} - 2d pf_i - 2cd + 2(h_n - h_{n+1})(c - \sqrt{e^2 - 4dg})} \quad (5)$$

ただし

$$\begin{cases} c = (pf_i^2 \cdot h_{n+1}^2 - h_n^2 + 2h_n R - 2h_{n+1} R) / (2pf_i) \\ d = 1 - 4(h_n - h_{n+1})^2 / pf_i^2 \\ e = 2(R - h_n) \cdot c (h_n - h_{n+1}) / pf_i \\ g = (R - h_n)^2 + c^2 - R^2 \end{cases} \quad (6)$$

4.2 平面加工

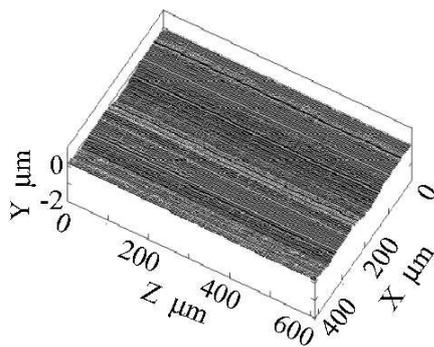
刃先移動加工法を用いて、加工した面性状を調べるために、平面を加工した。加工条件を表 1 の実験 A に示す。速度比 r_v を 0.05 に設定し、切込み深さを 50 nm に設定した。また、加工した平面は 0.8 mm×0.6 mm で、深さは 16 μm である。計算したピックフィード量は 50 nm である。加工時間を短縮するために、短辺をピックフィード方向にし、長辺を送り方向にした。

Table 1 Cutting conditions

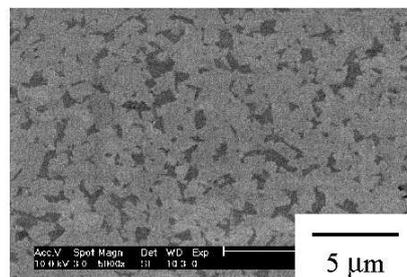
| | Experiment A | Experiment B | Experiment C |
|-------------------|---------------------------------|--------------|--------------|
| Workpiece | Binderless Tungsten carbide J05 | | |
| Interpolation | 3 μm | 2.5 μm | 0.05 μm |
| Speed ratio r_v | 0.05 | | |
| Depth of cut | 50 nm | | |
| Feed rate | 5 mm/min | | 3 mm/min |
| Cutting fluid | Oil mist | | |

加工時間は 78.8 時間であり，加工距離は 9,856 mm である。

加工した平面を図 5 に示す。(a)は小坂研究所製 SE3500 で測定した結果で，(b)は SEM 写真である。測定した結果から送り方向とピックアップ方向からそれぞれ 5 つの断面を選択し，表面粗さを計算した。まず送り方向の表面粗さ R_z は 50~70 nm であり，5 つの断面の平均値は 60 nm である。そして，ピックアップ方向の表面粗さ R_z は 70~80 nm であり，平均値は 74 nm であった。この結果，両方向ともに良好な表面を得られることが確認できた。



(a) Measured result



(b) SEM photo

Fig.5 Machined plane

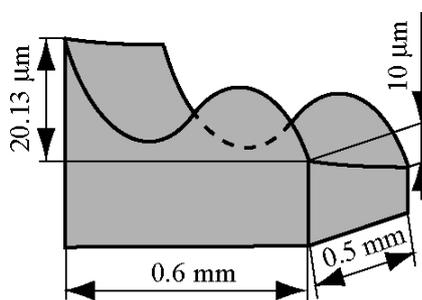


Fig.6 Target shape

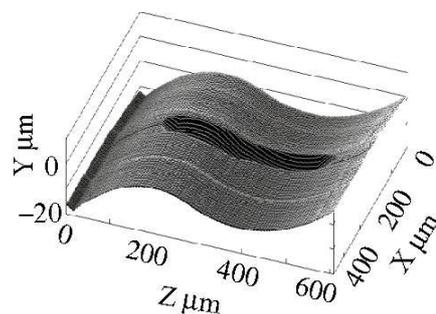
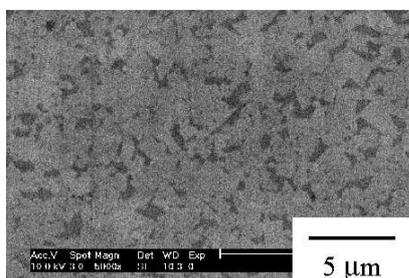


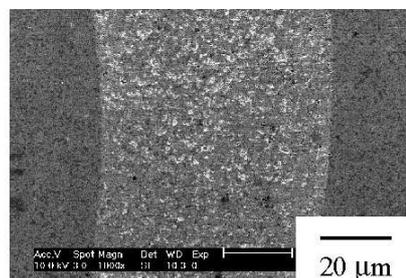
Fig.7 Measured result

4.3 曲面加工

次に，刃先移動加工法を用いて，自由曲面の加工を行った。目標形状を図 6 に示す。Z 方向において凹曲面と凸曲面で組み合わせた形状であり，X 方向の両端での高さが 10 μm 異なる。加工条件を表 1 の実験 B に示す。加工時間は 69.5 時間であった。さらに，加工した曲面上に，半径が 0.4 mm で組み合わせた S 型曲線状の溝加工を行った。加工条件を表 2 の実験 C に示す。曲線溝の加工時間は 2.3 時間である。曲面加工の切削距離は 6,312 mm であり，曲線溝の加工距離は 40 mm である。測定した結果を図 7 に示す。

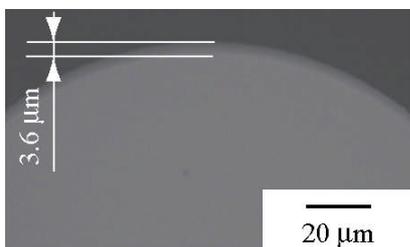


(a) Curved surface

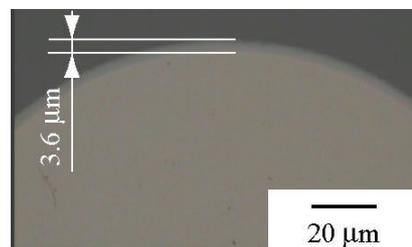


(b) Curved microgroove

Fig.8 SEM photo of machined curved surface and microgroove



(a-1) Rake face (before machining)



(a-2) Rake face (after machining)



(b-1) Flank face (before machining)



(b-2) Flank face (after machining)

Fig.9 Tool used in the machining

この図に示すように、目標形状通り、曲面と曲線の加工を実現することができた。また、加工した曲面と曲線溝の SEM 写真を図 8 に示す。(a)は曲面の写真で、(b)は曲面上の溝写真である。これらの図に示すように、平面加工と同じ良好な表面性状を得られたことが分かった。

平面加工及び曲面加工では同一工具を使用した。加工前後の工具のすくい面と逃げ面写真を図 9 に示す。総切削距離は 16,208 mm である。図 9(a)に示すように、加工前後の工具のチャンファの幅は両方とも 3.6 μm 程度であり、刃先の後退がほとんど発生していないことを確認した。また、同図の(b)に示すように、加工後の工具の逃げ面に摩耗やチッピングなどは観察されなかった。以上の結果により、工具摩耗を抑制しながら目標形状通り良好な曲面と曲線溝の創成を実現できた。

5. おわりに

本研究では、すでに提案してきた刃先移動加工法を自由曲面の加工へ拡張し、工具摩耗を抑制できる曲面の加工法を確立することを目的とし、以下の結論を得た。

1. 刃先移動加工法を面加工に適用した。平面加工を実施し、送り方向とピックフィード方向ともに良好な表面粗さを得られることを確認した。
2. 刃先移動加工法を用いて自由曲面を加工し、加工した自由曲面上に曲線状な溝加工を行った。工具摩耗を抑制しながら、目標形状通り、曲面と曲線の創成を実現できた。

参考文献

- 1) X. Tang, M. Yoshinaga, K. Nakamoto, T. Ishida, Y. Takeuchi: Ultraprecision Microgrooving of Hard Material by Diamond Tool with Special Chamfer to Realize Tool Wear Suppression, Journal of Japan Society for Precision Engineering, 76, 9 (2010) 1082.
- 2) X. Tang, K. Nakamoto, K. Obata, T. Ishida and Y. Takeuchi: Effect of Cutting Point Swivel Machining by Using Tool with Special Chamfer, Journal of Japan Society for Precision Engineering, 78, 8(2012) 705.
- 3) 小林篤史:超精密ダイヤモンド切削工具「UPC」による最新の金型加工, 型技術, 24, 6 (2009) 59.
- 4) I. Inasaki: Grinding of Hard and Brittle Materials, Ann. CIRP, 36, 2 (1987) 463.
- 5) T. Nakasuji, S. Kodera, S. Hara, H. Matsunaga, N. Ikawa and S. Shimada: Diamond Turning of Brittle Materials for Optical Components, Ann. CIRP, 39, 1 (1990) 89.
- 6) J. Yan, K. Syoji and T. Kuriyagawa: Ductile-Brittle Transition at Large Negative Tool Rake Angles, Journal of Japan Society for Precision Engineering, 66, 7 (2000) 1130.
- 7) T. Fujii, M. Hirano, T. Shibukawa, T. Ishida, Y. Takeuchi: Study on Precision Machining of Glass Lens Mold with Minute Structures: Precision Machining of Glass Lens Mold with Fresnel Shape Applying Complex Machining Process, Journal of Japan Society for Precision Engineering, 74, 12 (2008) 1298.
- 8) Y. Takeuchi, M. Yokoyama, T. Hisaki, H. Suzuki, and M. Sato: 6- Axis Control Finishing of Workpiece with Sculptured Surface, Journal of Japan Society for Precision Engineering, 60, 12 (1994) 1786.
- 9) H. Suzuki, K. Fujii, T. Okino, T. Yokoyama, T. Ono, M. Watanabe, N. Wajima, T. Kitajima and S. Okuyama: Study on Precision Cutting of Non-Axi-Symmetric Aspherical Surface (1st Report) – Form Generation by 3-Axes Controlled Shaper with Diamond Tool-, Journal of Japan Society for Precision Engineering, 65, 11 (1999) 1611.