セラミックスの超精密マイクロ切削*

Ultraprecision Micro Machining of Ceramics

鈴木浩文** 岡田 睦**

Hirofumi SUZUKI and Mutsumi OKADA

Key words

milling tool, cutting, ceramics, polycrystalline diamond, monocrystalline diamond, nano polycrystalline diamond, laser machining, EDM, ductile mode cutting

1. はじめに

これまで超精密加工／計測技術は非球面光学デバイスの普及とともに発展してきた。デジタルカメラ、カメラ機能付き携帯電話、DVD ピックアップ、光通信用デバイス、医療用内視鏡カメラ、ソーラ発電集光用フレネルレンズ、車載用赤外レンズなど自動車用のカメラなど、家電製品から医療部品まで多岐にわたる¹⁾。

ガラス製レンズは型を用いたガラスプレス法により量産されるが、ガラスは転移点、屈服点、融点が450～800℃と高く、プラスチック成形用で用いられている無電解Niめっき金型を用いることができないため¹⁾²⁾、図1に示すように超硬合金、SiCなどのセラミックを用いて成形する必要がある。セラミック型はダイヤモンド砥粒を結合したダイヤモンドホイール（砥石）が用いて研削加工する必要がある^{3)~5)}。その結合材（接着材）には金属、陶質、樹脂などが用いられ、工具摩耗が顕著であるため形状精度を長

く維持することが困難である。また、頻繁な砥石成形（ツルueing）が必要である。このように研削加工では、砥石の加工の安定性に欠けるのが最大の欠点といえ、多くの非加工時間を含む加工時間と労力、ノウハウが不可欠である。さらに表面粗さを改善するために、仕上げに遊離砥粒を用いた研磨加工を行う必要がある⁶⁾。

一方、単結晶ダイヤモンド製オールバイトによる非球面旋削でも鏡面加工は可能であるが、工具寿命が短く経済的に実用的ではない⁵⁾。筆者らはPCDを使った超硬金型の高精度・高能率加工も行っているが²⁾³⁾、さらに高精度化の要求がある。そこで、これらの要求を満たすために、レーザ加工により多数の切れ刃をもつマイクロダイヤモンド製フライス工具を作製してセラミックを超精密加工することを提案し、ダイヤモンド工具の試作と加工特性を評価した。本稿ではその概要を紹介する。

2. 研削加工の問題点

セラミックスの研削加工では、ダイヤモンドホイール（砥石）が一般によく用いられる。砥石は、砥粒、結合剤、気孔の3要素で構成されている。特に非球面レンズ型の研削加工ではレジノイド・ダイヤモンドホイールが用いられる。型の鏡面性を重視するため、柔らかい結合剤のレジノイドが用いられることが多い。結合剤が柔らかいと、研削抵抗にともなって砥石が変形し、砥粒と工作物の接触数が増え、一刃当たりの切り込み量が減少し、鏡面加工性が高くなる。反対に、形状精度を重視するときは、硬い結合剤のビトリファイドが用いられることが多い。

従来の金型研削で用いられている砥石には以下の問題点がある。①砥粒の結合度が大きくなく、砥石摩耗が大きく形状精度が安定しない。②すくい角が負（マイナス）に大きく切れ味が悪く、切削抵抗が大きい。③砥粒の大きさ、結晶方位、すくい角、逃げ角に分布があり一定でなく、加工特性が安定しない。

そこで、工具のすくい角、逃げ角、切れ刃間隔、結晶方位が設計に基づいて制御されているエンジニアリングツールを開発するため、放電加工やレーザ光を用いて多結晶ダ

図1 非球面ガラスレンズの成形プロセス

*原稿受付 平成31年4月22日

**正会員 中部大学工学部機械工学科（愛知県春日井市松本町1200）

イヤモンド (PCD)、単結晶ダイヤモンド (SCD) に三次元加工を施し、多数の切刃を有するマイクロフライス工具を試作し、超硬や SiC を精密に切削することを試みた。

マイクロフライス工具による微小切削は、以下の特徴をもつ。①断続切削であるため工具温度の上昇が抑制される。②そのため旋削でのバイトほど工具摩耗が大きくなる。③多刃工具であるため実切り込み量は見かけの切り込み量より十分に小さくなり、硬質脆性材料でも延性モードの切削が実現しやすい。④工具は回転するため、刃先の輪郭精度の影響を受けず、非球面形状の加工精度が向上する。

3. 多結晶ダイヤモンド (PCD) 製 マイクロフライス工具

PCD (多結晶ダイヤモンド) はダイヤモンド砥粒とタングステン (W) やコバルト (Co) などの金属粉末を高温で焼結したものである。この PCD を砥石として用いて研削加工するとメタルボンドホイールと同様に砥石摩耗が小さいものの、目詰まりが多く高能率の研削加工は困難である。そこで、この PCD に溝を入れたマイクロフライス工具を開発して、目詰まりを抑制し切削様式の高精度で高能率の加工を行うことができることを紹介する。

図 2 に PCD マイクロフライス工具のファブリケーションプロセスを示す。ワイヤ放電により PCD 基板を切断し、超硬製シャンクに接合し、外周を研削加工したあと、研削砥石で微細溝を入れた。こうして試作した工具の SEM 写真を図 3 に示す。刃数は 40 である^{7,8)}。

加工は 4 軸制御超精密加工機 ULG-100D (SH³) (東芝機械(株)製) を用いて行った。位置決めはリニアモータ駆動の同時 4 軸 (X, Y, Z, C) 制御駆動で、位置決め分解能は 1 nm である。加工の様子を図 4 に示す。研削スピンドルには最大回転数 60000 min^{-1} の空気静圧軸受を用い、上記マイクロフライス工具を超精密スピンドル用に改造した焼きばめチャックにより $0.5 \mu\text{m}$ 以下の同軸度になるように固定した。非球面工作物 (微粒子超硬合金) はジグに接着した後、真空チャックによりワーク主軸に固定した。ワーク主軸は多孔質の空気静圧軸受である。

マイクロ球面レンズアレイ成形型の研削の原理を図 5 に示す。工作物を回転スピンドルに取り付け、その回転スピンドルの回転軸に対して傾斜させて設置した回転工具を工作物に押し付け、さらに、回転スピンドルの回転軸と工作物の加工点の中心との距離を一定に保ちながら、回転する工作物の回転と同じ方向に、かつ同じ速度で工具を旋回させて凹面の球面形状の穴を精密加工し、さらに工作物上の位置を変えて上記一連の動作を複数回繰り返すことを特徴とする精密加工法である⁷⁾。切削条件を表 1 に示す。

加工後のマイクロレンズアレイ金型の曲率半径を $2 \mu\text{m}$ のダイヤモンドスタイラスを有する Form Talysurf により計測し、工具摩耗量の変化を評価した。また、工作物の表面粗さも非接触粗さ計 New View (ZYGO 社) により評

図 2 PCD マイクロフライス工具の試作プロセス

図 3 試作した PCD 工具

工具材質	多結晶ダイヤモンド
粒子径	$0.5 \mu\text{m}$
外径	$\phi 2 \text{ mm}$
先端半径	0, 50, $100 \mu\text{m}$
すくい角	-20°
切れ刃数	40

図 4 超硬型の超精密切削の様子

表 1 切削条件

工具回転数	60000 min^{-1}
切り込み	$10 \mu\text{m}$
送り速度	1 mm/min
ピックフィード	0.6 mm/min
クーラント	白灯油

図 5 同時 4 軸制御のマイクロレンズアレイ金型の加工法

価した。切削加工した超硬合金製のマイクロレンズアレイ型の微分干渉顕微鏡写真を図 6 に示す。2000 穴加工した。この表面粗さの測定結果を図 7 に示す。横軸はレンズアレイの球面モールドの加工数である。良好な表面粗さが得られているのが分かる。

同様に PCD 工具を用いてフレネルレンズ金型の試作を行った結果を示す。フレネルレンズ金型の加工法の模式図を図 8 に示す。鋭利な段差で構成されるフレネル形状の超精密切削をするために、Y-Z 軸同時 2 軸制御が必要である。加工点における工作物の回転方向と工具の回転方向が平行関係になるような工具軌跡で制御し、先端が鋭利な

図6 超硬製マイクロレンズアレイ型

図7 PCD 工具により加工した金型の表面粗さ

図8 フレネルレンズ金型の切削法

図9 フレネル形状切削用のPCD フライス工具

切れ刃をもつ工具を用いることによって、超精密加工が可能になる⁸⁾。フレネル形状加工用に試作したPCD工具を図9に示す。先端が45°ととがった形状に加工した。加工条件を表2に示す。工具のすくい角を -20° とし、刃数は40個とした。フレネル形状の段差を $6\mu\text{m}$ とした。切削加工後の超硬合金製フレネルレンズ金型のノマルスキー顕微

表2 マイクロフライス工具の仕様

材料	単結晶ダイヤモンド
結晶方位	(110)
外径	$\phi 2\text{ mm}$
先端の曲率半径	$R=0, 0.5\text{ mm}$
すくい角	-40°
逃げ角	0°
刃数	10

図10 加工後のフレネル形状金型の微分干渉顕微鏡写真

工具	PCD
刃数	40
回転数	58000 min^{-1}
工作物	超硬合金
形状	フレネル
段差	$6\mu\text{m}$
回転数	131 min^{-1}
切り込み	$0.5\mu\text{m}$
送り速度	$0.5\mu\text{m/min}$
クーラント	白灯油

(a) 形状誤差曲線(基準形状: 球面)

(a) 形状誤差曲線(基準形状: フレネル形状)

図11 加工後のフレネル形状金型の加工精度

鏡写真を図10に示す。鏡面に加工されている。加工後のフレネル形状金型の加工精度を図11に示す。フレネル形状の段差はほぼ設定どおりの $6\mu\text{m}$ が得られており、形状精度は約 $0.2\mu\text{m}$ P-Vが得られている。

4. 単結晶ダイヤモンド (SCD) 製 マイクロフライス工具

前章のPCD (多結晶ダイヤモンド) を用いたフライス工具よりさらに硬い材質が必要である。そこで単結晶ダイヤモンド製のフライス工具を開発した。円柱状に加工した単結晶ダイヤモンドを図12に示すように超硬製の円柱状

図 12 単結晶ダイヤモンド工具のレーザ応用創成プロセス

図 13 レーザ光により創成した単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の SEM 写真

シャンクにろう付けし、3軸制御駆動テーブルに固定してレーザビームを3次元制御して多数の切刃を有するマイクロフライス工具を試作した。このようにしてレーザビームを用いた三次元加工により試作した単結晶ダイヤモンド製のマイクロフライス工具の SEM 写真を図 13 に示す。工具径は $\phi 2$ mm, 先端 R は 0.2 mm, 刃数 20 とした⁹⁾。

これらの工具を用いて、 $\phi 3$ mm の微粒子超硬製非球面金型を表 3 の条件で切削した。通常の仕上げ研削と同じように仕上げ加工時の総切り込み量を $5 \mu\text{m}$ とした。通算 20 個の超硬金型を仕上げた。

切削後の非球面金型の形状精度の測定値の変化を図 14 に示す。初期の金型加工において工具半径誤差や位置決め誤差を補正して $0.1 \mu\text{m P-V}$ の形状精度を得ておき、その後は補正加工を一切行わず加工し続け、その間の形状精度の変化を評価した。形状測定は $2 \mu\text{m}$ のダイヤモンドスタイルスを有する接触式の測定器フォームタリサーフにより行った。補正加工なしでも形状誤差の変化は従来の工具と異なり、わずかであった。また、工具先端のアールの影響はそれほど顕著ではなかった。

切削後の超硬製金型の微分干渉顕微鏡写真を図 15 に示す。また、その非接触粗さ計で測定した表面粗さ曲線を図 16 に示す。単結晶ダイヤモンド工具の刃先で引っかいた痕が見られ、延性モードの切削面が得られていることが分かる。図 17 に超硬の切りくずの電子顕微鏡写真を示す。流れ形に近い形態であり、超硬が切削されていることが分かる。

表 3 非球面加工の切削条件

金型	バインダレス微粒子超硬	
外径	$\phi 5$ mm	
形状	非球面	
回転数	100 min^{-1}	
工具	単結晶ダイヤモンド	
すくい角	-40°	
逃げ角	0°	
刃数	10	
回転数	50000 min^{-1}	
荒加工	切り込み	$1 \mu\text{m}$
	送り速度	0.5 mm/min
	回数	4
仕上げ加工	切り込み	$0.5 \mu\text{m}$
	送り速度	0.1 mm/min
	回数	2
切削液		白灯油ミスト

図 14 微粒子超硬製非球面金型の形状精度の変化

図 15 切削後の超硬製金型の微分干渉顕微鏡写真

5. 各種工具材質の耐摩耗性

ガラス成形用の形材として用いられている微粒子超硬合金（日本タングステン(株)製 RCCFN）を用いて、摩耗特性を研削比により評価した。切削条件を表 3 に示す。工具の摩耗の評価は工具を取り外すことなく、グラファイトカーボン板に回転工具を押し付けてプランジカットして工具刃先形状のレプリカをとり、レーザプローブ走査方式の非接触測定器（NH3-3UP）により計測し、差を計算し定量的に評価した。

各種マイクロフライス工具により微粒子超硬合金製の非球

図 16 切削加工後の表面粗さ曲線

図 17 超硬合金の切りくず

面金型の切削加工を行い、工具摩耗を計測した。この結果から工具の研削比（工作物の除去体積/工具の摩耗体積）を計算した結果を図 18 に示す。(a) は単結晶ダイヤモンド、(b) は多結晶ダイヤモンド (PCD)、(c) はレジンボンドダイヤモンドホイール、(d) は CVD ダイヤモンドでの結果である。単結晶ダイヤモンド製フライス工具の場合、従来砥石に比べて摩耗速度は $1/100 \sim 1/200$ 倍、PCD で $1/5 \sim 1/10$ 倍、CVD ダイヤモンドで $1/10 \sim 1/20$ 倍程度であり、単結晶ダイヤモンドがもっとも優れていることが分かる。

6. ナノ多結晶ダイヤモンド (NPD) 製 マイクロフライス工具

単結晶ダイヤモンドは非常に硬度は高いが、結晶方位があるため、結晶方位により強度と硬度が異なる。本著のような回転工具を作製する場合、多数の切れ刃が全周に創成されるが、結晶方位により耐摩耗性が異なり、実質的な有効な切れ刃は見かけの刃数より小さくなり、総合的な耐摩耗性は減少することになる。そこで、近年注目されているナノ多結晶ダイヤモンド (NPD) に着目し、マイクロフライス工具を試作し加工特性を評価した。

図 18 各種ダイヤモンド工具における工具摩耗

単結晶ダイヤモンド工具と同様に、ナノ多結晶ダイヤモンド (NPD) 製のマイクロフライス工具をレーザ加工により三次元加工により試作した。その電子顕微鏡写真を図 19 (a) に示す。工具径は $\phi 2$ mm, 先端 R は 0.2 mm, 刃数 20 とした¹⁰⁾。

試作したナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具を用いて、図 20 に示すように SiC 製非球面アレイレンズ金型の切削実験を行った。表 4 の条件で楕円体アレイ金型を試作した結果を示す。工作物として単結晶 SiC の Si 面を用いた。工具を 50000 min^{-1} の回転速度で回転させながら Y 方向に駆動させアレイレンズの加工を行った。各アレイの加工では切り込み $2 \mu\text{m}$ で 20 回切り込んで加工を行い、 9×8 個 (計 72 個) のアレイ形状をテキスチャリング加工した。X (横) 方向 (工具回転方向) の曲率半径は 1.4 mm で、Y (縦) 方向 (工具走査方向) の曲率半径は 2.4 mm とした。切削加工後の微分干渉顕微鏡写真を図 21 に示す。非常に良好な鏡面が得られているのが分かる¹⁰⁾。

また、図 19 (b) の刃先がとがった工具により単結晶 SiC 上に V 溝加工を行った結果を図 22 に示す。比較的シャープなエッジが得られているのが分かる¹⁰⁾。

7. お わ り に

ガラス成形用のセラミック型はダイヤモンドホイール (砥石) を用いた研削加工により加工されているが、砥石摩耗が大きいなど加工精度、能率が悪いという欠点があった。そこで、超硬や SiC などのセラミック材料を精密切削するために、多結晶ダイヤモンド (PCD)、単結晶ダイヤモンド (SCD)、ナノ多結晶ダイヤモンド (NPD) 製のマイクロフライス工具を試作し、セラミックスに対して鏡面切削できることを示した。ナノ多結晶ダイヤモンド > 単結

(a) 工具の先端曲率半径：0.2 mmR

(b) 工具の先端曲率半径：0 mmR

図19 ナノ多結晶ダイヤモンド（NPD）製のマイクロフライス工具

図20 楕円体マイクロアレイ切削加工法

図21 単結晶 SiC 製楕円体アレイレンズ金型

晶ダイヤモンド>PCDの順に耐摩耗性と工具寿命に優れており、研削加工に代わる方法として可能性について述べた。

参考文献

- 1) 鈴木浩文, 北嶋孝之, 奥山繁樹: 軸対称非球面の高精度切削に関する研究—工具の各種誤差要因が形状誤差に与る影響およびその最適補正法の検討—, 精密工学会誌, **65**, 3 (1999) 401-405.
- 2) H. Suzuki, M. Okada, Y. Masuda, Y. Namba, K. Miura, S. Morita and Y. Yamagata: Ultraprecision cutting of nickel plated mold for X-ray mirror, Journal of Automation Technology, **10**, 4 (2016) 624-631.
- 3) H. Ohmori and T. Nakagawa: Utilization of Nonlinear Conditions in Precision Grinding with ELID (Electrolytic In-Process Dressing) for Fabrication of Hard Material Components, Annals of the CIRP, **46**, 1 (1997) 261-264.
- 4) H. Suzuki, S. Kodera, T. Nakasuji and K. Syoji: Precision Grinding

表4 切削条件

材料	多結晶ダイヤモンド (NPD)	
回転数	50000 min ⁻¹	
ワーク	CVD-SiC	単結晶 SiC (SC-SiC)
ビッカース硬さ	3175 HV	Si 面 3623 HV
形状	非球面アレイ ($n_x 9 \times n_y 8$)	
曲率半径	1.4 mm	
切り込み	2 μm	
切り込み回数	20	
送り測	0.4 mm/min	
クーラント	ソリューションタイプ

図22 単結晶 SiC 基板上での V 溝加工

of Aspherical CVD-SiC Molding Die, International J. of Japan Society for Precision Engineering, **32**, 1 (1998) 25-30.

- 5) E. Shamoto and T. Moriwaki: Ultraprecision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting, Annals of the CIRP, **48**, 1 (1999) 441-444.
- 6) H. Suzuki, S. Hamada, T. Okino, M. Kondo, Y. Yamagata and T. Higuchi: Ultraprecision finishing of micro-aspheric surface by ultrasonic two-axis vibration assisted polishing, Annals of the CIRP, **59**, 1 (2010) 347-350.
- 7) H. Suzuki, T. Moriwaki et al.: Precision cutting of aspherical ceramic molds with micro PCD milling tool, Annals of the CIRP, **56**, 1 (2007) 131-134.
- 8) H. Suzuki, T. Furuki, M. Okada, K. Fujii and T. Goto: Precision cutting of structured ceramic molds with micro PCD milling tool, International Journal of Automation Technology, **5**, 3 (2011) 277-278.
- 9) H. Suzuki, M. Okada, K. Fujii, S. Matsui and Y. Yamagata: Development of micro milling tool made of single crystalline diamond for ceramic cutting, Annals of the CIRP, **62**, 1 (2013) 59-62.
- 10) H. Suzuki, M. Okada, W. Asai, H. Sumiya, K. Harano, Y. Yamagata and K. Miura: Micro milling tool made of nano-polycrystalline diamond for precision cutting of SiC, Annals of the CIRP, **66**, 1 (2017) 93-96.

鈴木浩文

1985 年大阪市立大学大学院工学研究科前期博士課程修了, 1997 年東北大学大学院工学研究科機械電子工学専攻, 博士 (工学).
研究内容: 非球面光学部品の超精密切削, 研削, 研磨, 成形, 超精密計測, レーザ加工
著書等: 機械加工学の基礎, コロナ社, 共著
Handbook of Ceramic Grinding & Polishing (2nd edition), Elsevier 社, 共著

岡田 睦

1992 年大阪教育大学大学院教育研究科前期博士課程修了.
研究内容: 超精密研磨, 超精密計測