

# マイクロフライス工具による超硬金型の超精密切削

鈴木 浩文, 岡田 睦 (中部大学)

藤井 一二, 岡田 浩一 (日進工具株)

デジタルカメラやカメラ付き携帯電話用などの非球面ガラスレンズは超高合金や SiC などのセラミック型を用いたガラスモールドにより量産されている。それらの非球面金型の超精密加工は、従来はダイヤモンドホイール (砥石) による超精密研削と研磨加工により行われている。さらに金型加工の高精度化・高能率化を行うために、レーザー光を用いて単結晶ダイヤモンド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、超硬製非球面金型の超精密切削を試みて実用レベルの切削加工の可能性を検証したので報告する。実験では、平面形状の超硬合金を用いて、マイクロフライス工具の摩耗量を評価し、非球面形状の金型を試作し、PCD 工具と比較した。

## 1. はじめに

デジタルカメラやカメラ付き携帯電話用などの非球面ガラスレンズは超高合金や SiC などのセラミック型を用いたガラスモールドにより量産されている。それらの非球面金型の超精密加工は、従来はダイヤモンド砥粒を樹脂で固めたレジンボンドダイヤモンドホイール (砥石) による超精密研削と研磨加工により行われている。これまで筆者らはそれらの加工の高精度化・高能率化を行うために PCD (多結晶ダイヤモンド) 製のマイクロフライス工具を開発し、超硬金型の非球面切削による仕上げ加工を実現した<sup>1)</sup>。

本報告では、さらに金型加工の高精度化・高能率化を行うために、レーザー光を用いて単結晶ダイヤモンド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、超硬製非球面金型の超精密切削を試みて実用レベルの切削加工の可能性を検証したので報告する。実験では、平面形状の超硬合金を用いて、マイクロフライス工具の刃先後退量と摩耗比の変化を評価した。さらにガラスレンズ成形用の非球面形状の超硬合金製金型を試作し、形状精度と表面粗さの変化を計測し PCD 工具と比較した。

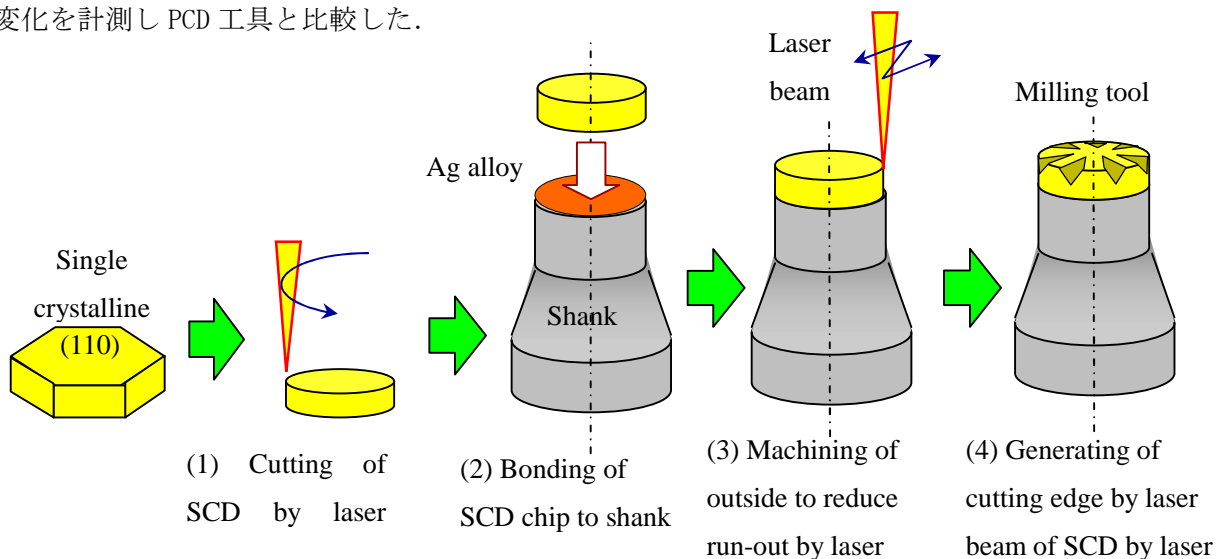


図1 単結晶ダイヤモンド製ミリング工具のレーザー加工プロセス

## 2. 単結晶ダイヤモンド製フライス工具の試作

単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の加工プロセスを図1に示す。円柱状に研磨した単結晶ダイヤモンドを超硬製の円柱状シャンクにろう付けし、図2に示すように3軸制御駆動テーブルに固定し、スポット径 $1\mu\text{m}$ に集光されたレーザービームを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。単結晶ダイヤモンドの方位は上面が(110)面となるようにした。上述のようにしてレーザー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3に示す。シャンク径は $\Phi 2\text{mm}$ 、工具径は $\Phi 2\text{mm}$ で、刃数は10枚とした。すくい角は $-40^\circ$ 、逃げ角は $0^\circ$ とした。

このようなマイクロフライス工具による微小切削の特徴は以下の通りである。図4に示すように断続切削であるため工具の加熱期間が短く、クーラントによる冷却期間が長いいため、工具温度が旋削加工のように上がらない。その結果、旋削におけるバイトほど工具摩耗が大きくなる。また、多刃工具であるため実切り込み量は見かけの切り込み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。さらに工具は回転するため、刃先の輪郭精度の影響を受けず真円として扱え非球面形状の加工精度に高周波数の形状誤差が生じにくい。

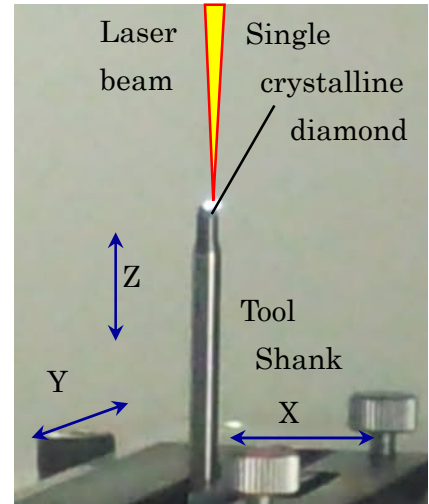
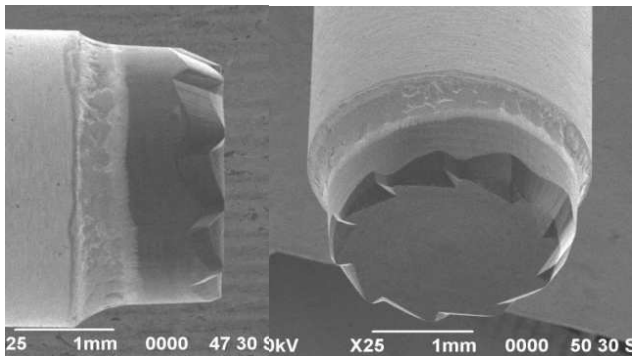


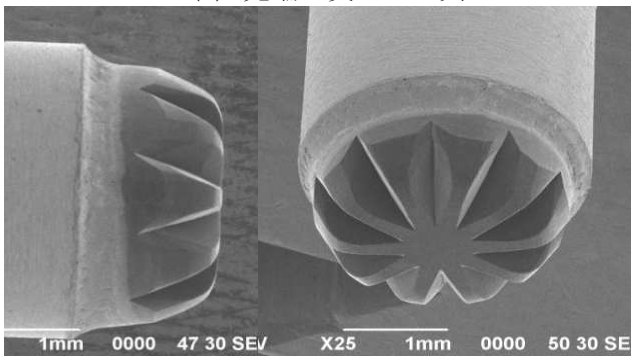
図2 レーザ加工の様子

表1 工具形状

工具	単結晶ダイヤモンド
外径	$\Phi 2\text{mm}$
先端R	0 および $0.5\text{mm}$
すくい角	$-40^\circ$
逃げ角	$0^\circ$
刃数	10



(a) 先端が尖った工具



(b) 先端にR0.5mmのアールがついた工具

図3 試作工具のSEM写真

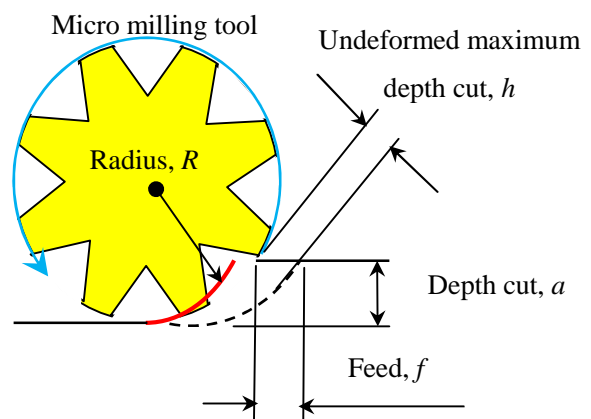


図4 フライス加工における断続切削のモデル

### 3. 実験装置

試作した単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具を用いて軸対称非球面金型の切削実験を行った。実験の外観図を図5に示す。超精密加工機 ULG-100D (SH3) を用いて、X、Z 軸の同時2軸制御で加工を行った。X、Y、Z 軸の案内面は転がり案内で駆動はリニアモータ駆動であり 1nm 分解能を有する。ワークスピンドル (C 軸) は多孔質空気静圧軸受で工具スピンドルは自成絞り空気静圧の高速エアスピンドルを 45° 傾斜させて斜軸切削を行った。切削実験では微粒子超硬合金 (日本タングステン株製 RCCFN) を用いた。最初に表1の基礎実験に良い工具摩耗を評価し、次に表2の条件で非球面切削実験を行った。工具は一定の速度で回転させながら半径方向に駆動した。工具の回転とワークの回転は直行する。

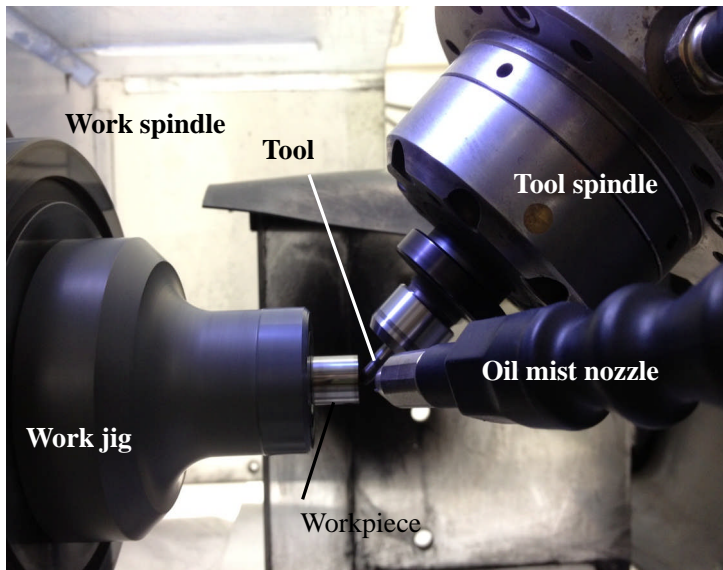


図5 超硬合金金型の切削の様子

表2 超硬合金の基礎切削条件

Mold	Binderless WC
Diameter	Φ10 mm
Form	Flat
Rotation	100 min <sup>-1</sup>
Tool	SCD
Rake angle	-40°
Relief angle	0°
Cutting edges	10
Rotation	60,000 min <sup>-1</sup>
Depth cut	0.5 μm/min
Feed rate	0.5 mm/min
Coolant	Oil mist

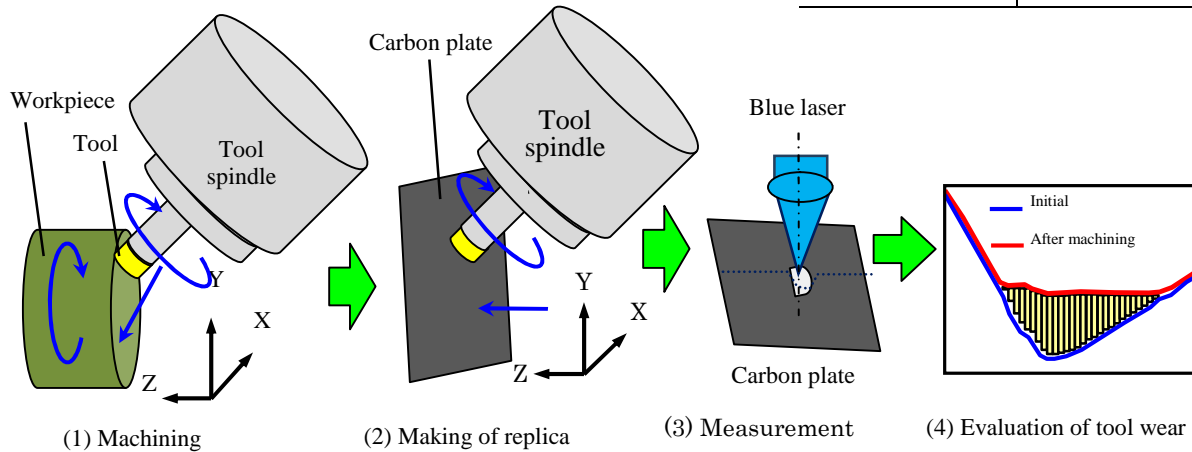


図6 工具摩耗のレプリカ測定法

### 4. 切削基礎実験の結果

ここでは工具として図3(a)の先端が尖ったフライス工具を用いて工具摩耗の基礎的実験を行なった。表2の条件でφ10mmの微粒子超硬合金を切削し、その都度、工具先端形状をカーボン材にプランジカットして転写し、その形状を非接触形状測定器 (NH) にて計測し、デジタルデータを図6に示すように重ね合せて、工具の摩耗量を算出した。

ダイヤモンド工具の摩耗の変化を図7(a)に示す。この計測から計算した刃先の最大後退量を図7(b)に示す。初期において先端が尖っていたが0.5 $\mu\text{m}$ x200パスの切削加工後は22 $\mu\text{m}$ 後退している。さらに図7(a)から計算した断面の摩耗面積を図7(c)に示す。このようにして計算したダイヤモンド工具の摩耗体積により超合金製ワークの加工体積を除したもの、すなわち工具摩耗比(研削加工における研削比に相当)の変化を図7(d)に示す。単結晶ダイヤモンド製のマイクロフライスの場合、3000-5000であった。レジンボンドダイヤモンドホイール(砥石)の場合の研削比が100-500程度であり、PCD工具の場合<sup>(3)</sup>、1000-5000程度にあるのに比べて摩耗が極めて小さいことがわかる。

超合金を0.5 $\mu\text{m}$ x200パスの切削加工後のマイクロフライス工具先端のSEM写真を図8に示す。先端がいずれの刃も平坦に摩耗しているのがわかる。工具の刃先が均等に当たっていることもわかる。また、超硬製のワークの切りくずのSEM写真を図9に示す。微粒子超合金は脆性材料であるが延性モードの切りくずが生成されているのがわかる。

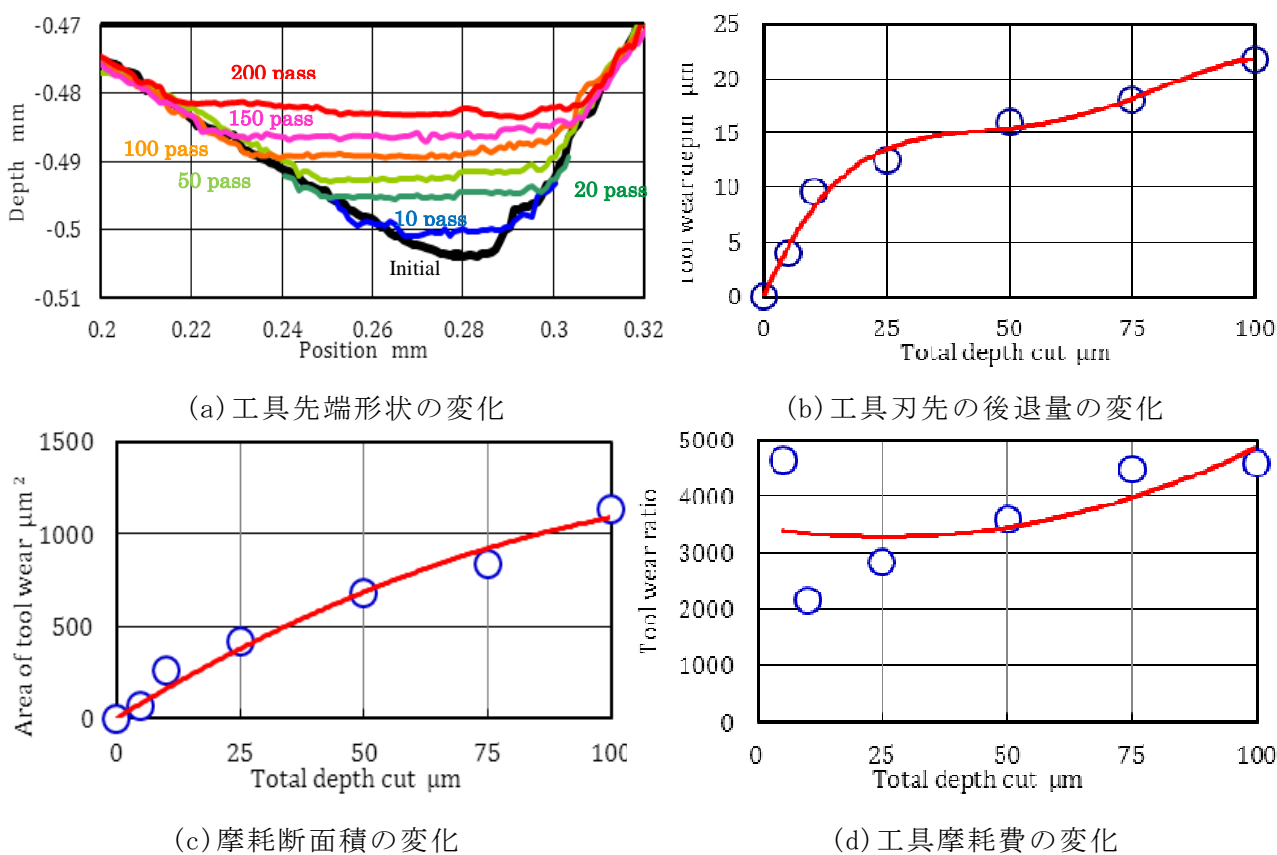


図7 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の工具摩耗

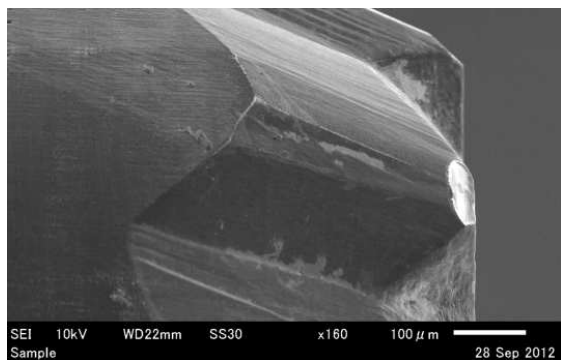


図8 切削後の工具刃先の摩耗のSEM写真

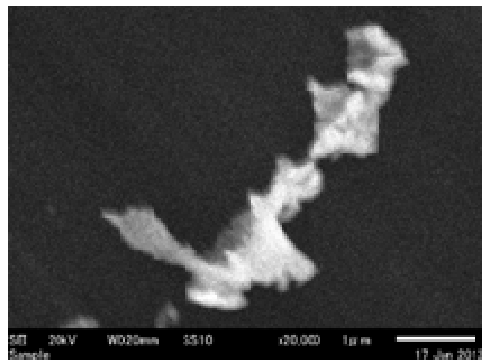
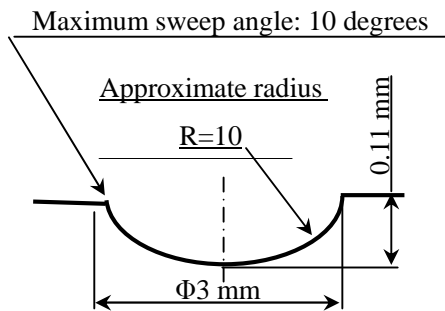


図9 超合金の切りくずのSEM写真



(a) 微粒子超合金製非球面金型外觀

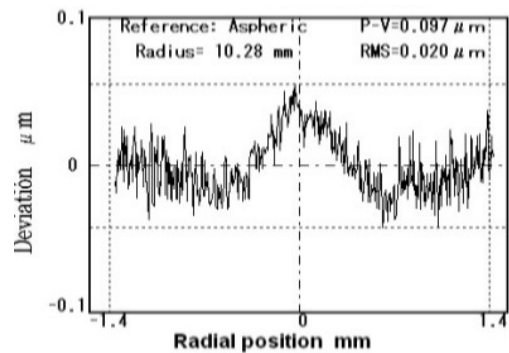


(b) 非球面形状

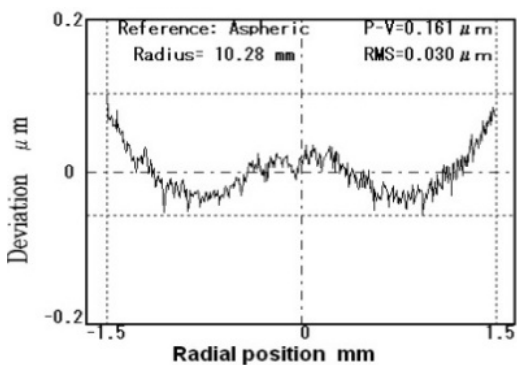
表 3 非球面金型の切削条件

Mold		Binderless WC
Diameter		Φ5 mm
Form		Aspheric
Rotation		100 min <sup>-1</sup>
Tool		Single crystalline diamond
Rake angle		-40°
Relief angle		0°
Number of cutting edges		10
Rotation		50,000 min <sup>-1</sup>
Rough cutting	Depth cut	1 μm
	Feed rate	0.5 mm/min
	Cutting times	4
Finish cutting	Depth cut	0.5 μm
	Feed rate	0.1 mm/min
	Cutting times	2
Coolant		White kerosine mist

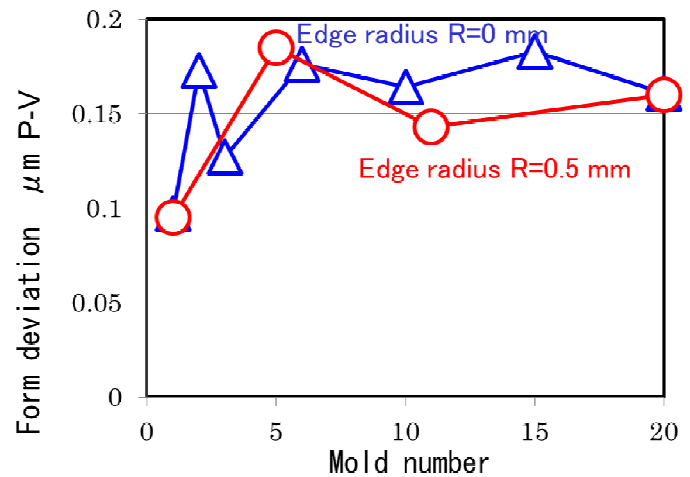
図 10 非球面切削実験用の微粒子超合金製金型



(a) 1 個目の金型の切削後の形状誤差曲線



(b) 20 個目の金型の切削後の形状誤差曲線



(c) 非球面金型の形状精度の変化

図 11 微粒子超合金製の非球面金型の加工形状精度

## 5. 非球面切削実験

次に、図 10 に示す  $\phi 3\text{mm}$  の微粒子超硬製非球面金型を切削し、金型の形状精度と表面粗さの変化を測定した。切削条件を表 3 に示す。工具としては先端が尖った工具（図 3(a)）と R がついた工具（図 3(b)）の 2 種類の工具を用い、 $\phi 3\text{mm}$  の非球面金型を切削し、形状精度を表面粗さの変化を評価した。通常の仕上げ研削と同じように仕上げ加工時の総切込量を  $5\mu\text{m}$  とした。通算 20 個の超硬金型を仕上げた。

微粒子超硬製非球面金型の形状精度の測定値の変化を図 11 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  $0.1\mu\text{mP-V}$  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。形状測定は先端が  $2\mu\text{mR}$  のダイヤモンドスタイラスを有する AMETEK 社の FormTalysurf により行った。補正加工無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ノマルスキー顕微鏡写真を図 12 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 13 に示す。単結晶ダイヤモンド工具の刃先で引掻いた跡が見られ、延性モードの切削面が得られていることがわかる。また表面粗さの変化を図 14 に示す。工具の先端にアールがついている場合の表面粗さが良好であることがわかる。工具先端が鋭いほど工作物への引っ掻き痕が深くなり、表面粗さが大きくなるものと言える。したがって、表面粗さをよくするためには先端に R がついた工具の方が良いことがわかる<sup>(3)</sup>。

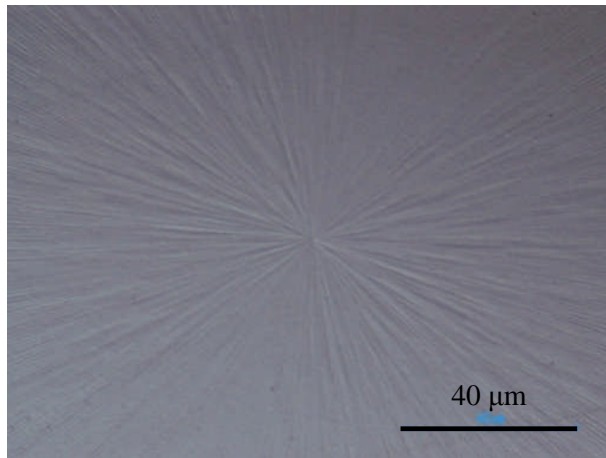


図12 超硬切削後の超硬の中心部のノマルスキー顕微鏡写真

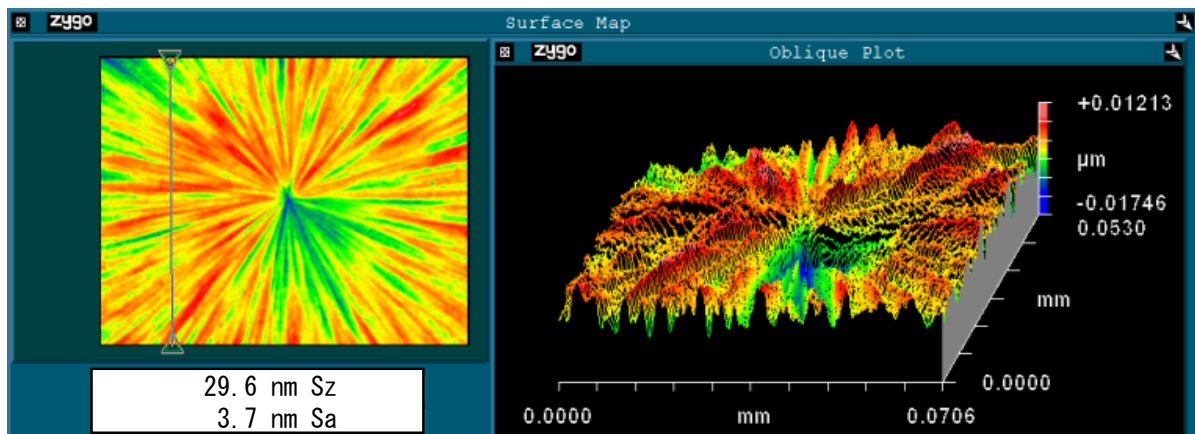


図 13 超硬切削後の超硬の中心部の表面粗さの例

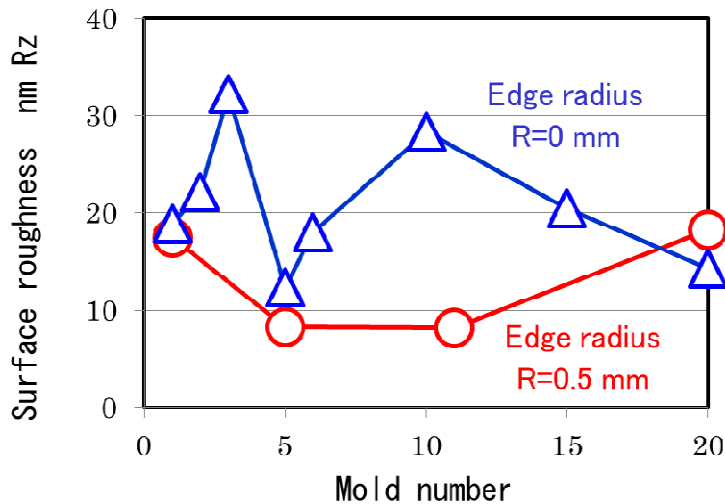


図14 微粒子超合金製の非球面金型の表面粗さの変化

従来のレジンボンドダイヤモンドホイールによる研削加工では工具摩耗が100倍以上大きいため、形状精度の変化が大きく、頻りにツルーイング・ドレッシングや補正加工を行わなければならなかったが、その頻度は大きく低下し、高精度・効能率化可能となった。

## 6. まとめ

本報告では、レーザ光を用いて単結晶ダイヤモンド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、超硬製非球面金型の超精密切削を試みて実用レベルの切削加工の可能性を検証した。その結果、これまで用いられたダイヤモンドホイール（砥石）やPCD工具よりもさらに高精度化と工具摩耗の抑制が可能であることが明らかとなった<sup>(3)</sup>。以上のように単結晶ダイヤモンド製の回転工具による断続切削を応用することにより、様々な高硬度材の微細形状の高精度・高能率加工が各産業分野で展開されるものと期待される。

## 参考文献

- (1) Suzuki H, Moriwaki T, et.al.: Precision cutting of aspherical ceramic molds with micro PCD milling tool, Annals of the CIRP 56, 1(2007) 131–134.
- (2) Suzuki H, et.al.: Development of micro milling tool made of single crystalline diamond for ceramic cutting, Annals of the CIRP 62, 1(2013) 59–62.
- (3) Suzuki H., Furuki T., Okada M., Fujii K., Goto T.: Precision Cutting of Structured Ceramic Molds with Micro PCD Milling Tool, International Journal of Automation Technology, 5, 3 (2011) 277-280.