

結晶ダイヤモンド製超微細マイクロフライス工具によるセラミックスの超精密加工

－ CVD-SiC 基板の微細加工 －

鈴木 浩文, 岡田 睦, 町田一道 (中部大学)

藤井 一二 (日進工具㈱)

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などのセラミック型を用いたガラスモールド (成形) 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遊離砥粒による鏡面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高精度化・高能率化を行うために SCD (単結晶ダイヤモンド) 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。しかし、金型材に更に硬い CVD-SiC の高精度・高能率加工が求められている⁽¹⁻³⁾。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、CVD-SiC 製非球面金型の超精密切削を行うこと検討した。

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などのセラミック型を用いたガラスモールド (成形) 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遊離砥粒による鏡面研磨加工により行われている。

しかしこの従来のプロセスでは、砥石のツルージングなどの被加工時間を含めた全体の加工プロセスと製造時間が長く、コストにおいて限界があった。また砥石の摩耗により、金型の制度の悪化が問題となっていた。それに対して、これまで筆者らはそれらの高精度化・高能率化を行うために SCD (単結晶ダイヤモンド) 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¹⁾。しかし、金型材に更に硬い CVD-SiC の高精度・高能率加工が求められている。

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、CVD-SiC 製非球面金型の超精密切削を行うことを提案する。そして、レーザ加工により単結晶ダイヤモンド製のマイクロフライス工具を試作し、実用レベルの切削加工の可能性を検証する。実験では、平面形状の CVD-SiC を用いて、マイクロフライス工具の摩耗量を評価し、非球面形状の微細金型を試作し、超硬合金金型の場合と比較した。

2. レーザ光の走査による形状創成の原理

切削加工や研削加工に代表される機械加工法では母性原理に基づいて形状が創成される。すなわち工具を工作機械で駆動し、その軌跡を工作物に転写して形状創成を行う (工具奇跡転写の原理に基づく)。それに対してレーザなどのビームにより形状を創成する場合は、研磨加工と同じ

く、滞留時間制御の原理に基づいて形状創成を行うものである。ビームの横方向の焦点位置は重要であるが、ビームに直行する方向の位置決めはそれほど重要ではない。

レーザー光を被加工面に一定時間滞留させるとある一定の形状の単一加工痕（Footprint）が図2に示すように創成される。この加工量分布は次式で表される。

$$d=d(x, y) \quad (1)$$

この単一加工痕を被加工面上において走査すると被加工面は重畳積分（Convolution）の原理から次式で示される除去分布の加工がおこなわれる。

$$\delta(x, y)=\iint d(u, v) \cdot T(x-u, y-v) \, du dv \quad (2)$$

$\delta(x, y)$ は被加工面の加工前の形状と目標形状の差の分布に相当する。したがってこの積分を逆変換することにより、被加工面のそれぞれ各ポイントを何秒間滞留すればよいか、すなわち単一加工痕の滞留時間の分布が計算できる。これを元に装置の各軸の動きをNC制御し一つの面を加工することになる。実際には各ポイント (x, y) においてレーザーの滞留時間 $T(x, y)$ を決定する必要な走査速度 $V(x, y)$ は y 方向のピッチを Y_p とすると以下で表される。

$$V(x, y)=Y_p/T(x, y) \quad (3)$$

加工ツールであるレーザー光は被加工面上を倣うだけであり平面や球面だけでなく自由曲面の加工をも容易に行うことができる⁴⁾。

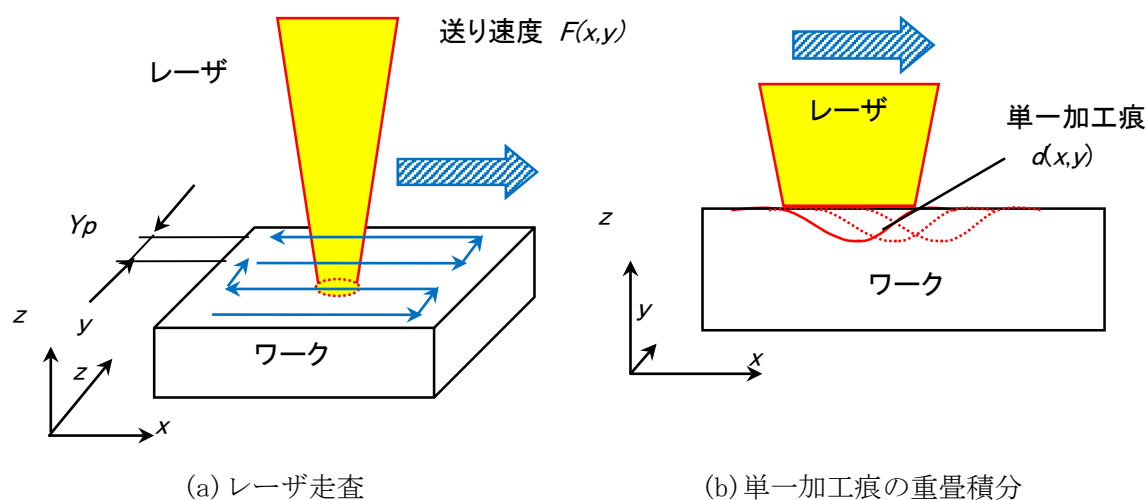


図2 レーザ走査によるマイクロフライス工具の創成

3. 微細レーザ光による単結晶ダイヤモンド製フライス工具の試作

円柱状に加工した単結晶ダイヤモンドを図3に示すように超硬製の円柱状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形状とSEM写真を図4および図5に示す。波長が約 $1\text{ }\mu\text{m}$ の赤外レーザビームを3次元走査して、多数の切刃を有するマイクロフライス工具を試作した。シャンク径は $\Phi 4\text{mm}$ 、工具径は $\Phi 2\text{mm}$ で、刃数は20枚とした。先端Rは 0mm および 0.5mm とし、すくい角は -40° 、逃げ角は 0° とした。

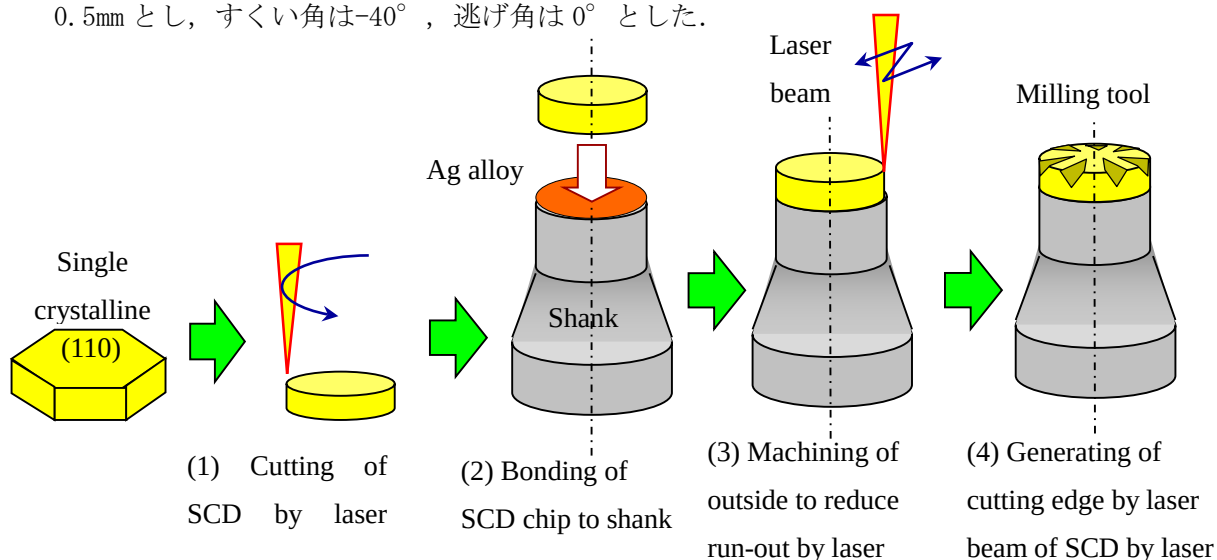


図3 単結晶ダイヤモンド製ミリング工具のレーザ加工プロセス

外径	$\Phi 2\text{ mm}$
先端R	$0\text{ }\mu\text{m}$
すくい角	-40°
逃げ角	0°
刃数	20

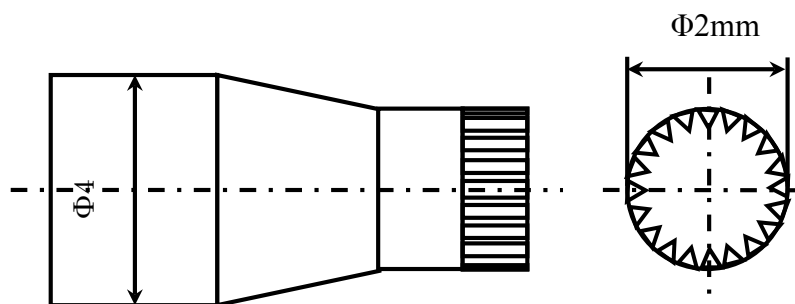
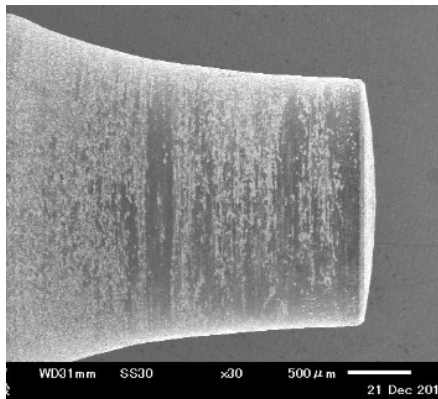
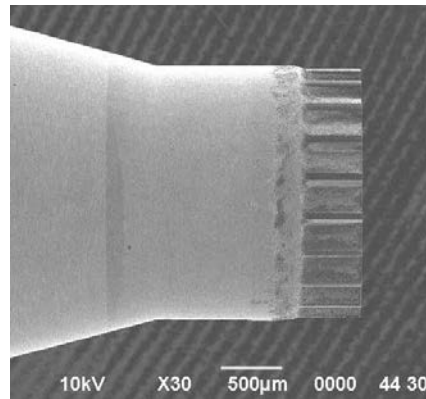


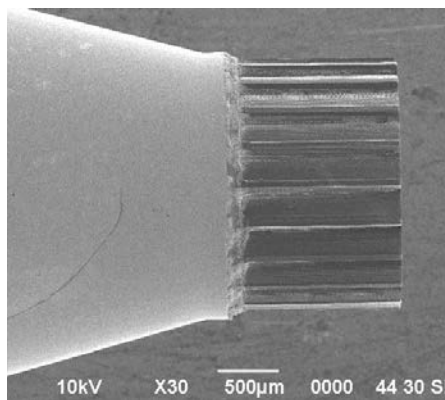
図4 摩耗評価用の工具形状



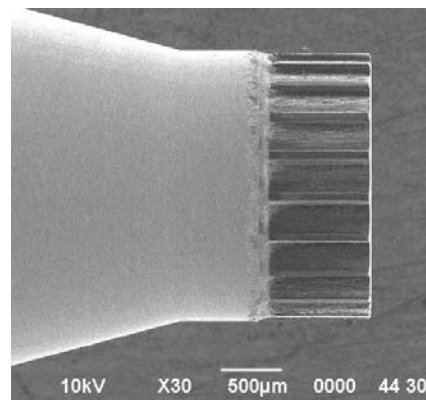
(a)ダイヤモンドホイール(#1200)



(b)PCD工具



(c)単結晶ダイヤモンド (SCD)



(d)CVDダイヤモンド

図5 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具

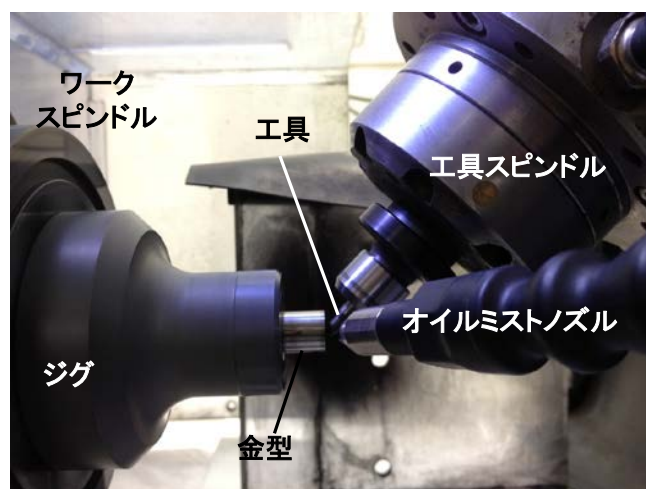


図6 超精密切削の外観

4. バインダレス超合金の切削基礎実験

切削実験の外観を図6に示す。10nm分解能の転がり案内ボールねじ駆動の超精密加工機 ULG-100A (HY3) を用いて、X、Z軸の同時2軸制御で加工を行った。工具スピンドルは高速エアスピンドルを45°傾斜させて焼嵌めで取り付け、軸対称非球面金型を斜軸スピンドルにより切削した。形材としてはガラス成形用の微粒子超合金（日本タングステン(株)製 RCCFN）を用いた。切

削条件を表1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面金型の切削加工を行い，工具摩耗を計測した．図7に単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具を用いて超硬合金製金型を切削した場合の工具刃先の形状の変化を示す．この図から工具の加工比（工作物の除去体積／工具の摩耗体積）を計算し多結果を図9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1/100～200倍，PCDで1/5～10倍，CVDダイヤモンドで1/10～20倍程度であり，単結晶ダイヤモンドがもっともすぐれていることがわかる⁽⁴⁾．

表1 切削条件

金型		微粒子超硬合金
外径		Φ5 mm
形状		非球面
回転数		100 min ⁻¹
工具回転数		50,000 min ⁻¹
荒加工	切込み	1 μm
	送り速度	0.5 mm/min
	切削回数	4
仕上げ加工	切込み	0.5 μm
	送り速度	0.1 mm/min
	切削回数	2
切削液		白灯油ミスト

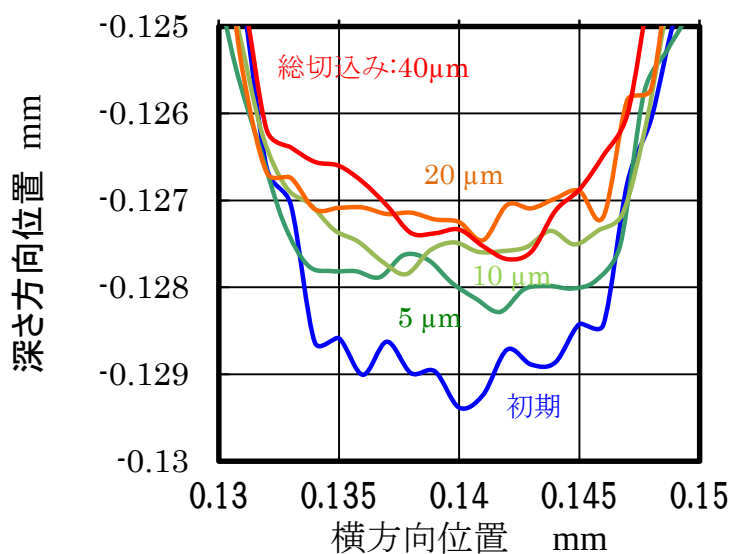
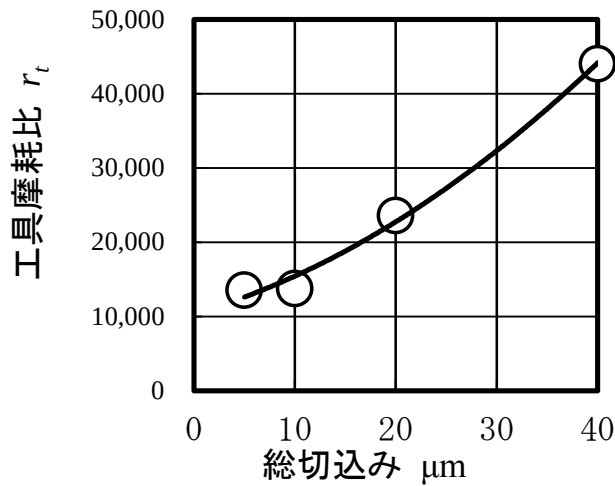
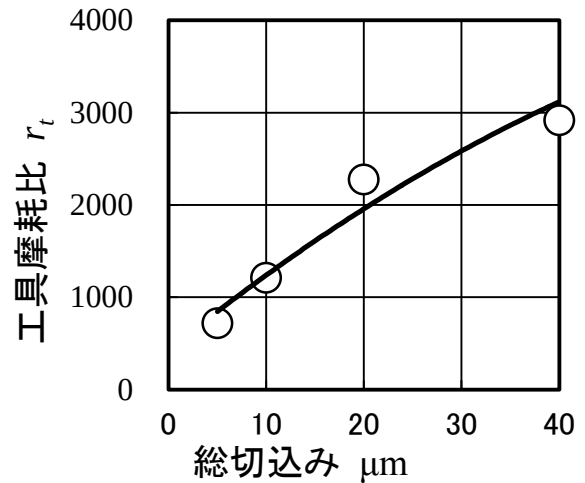


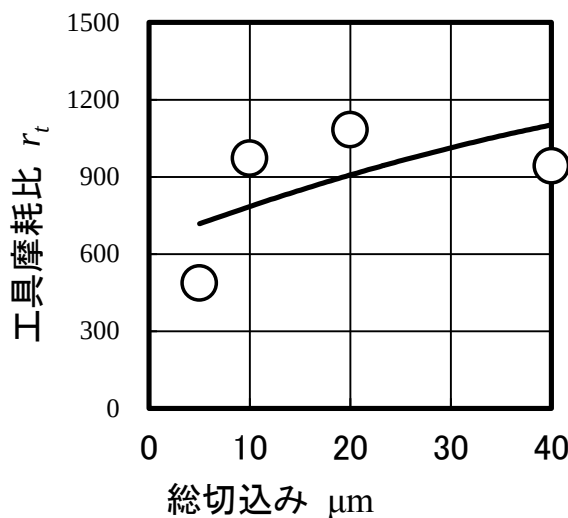
図7 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の工具形状の変化



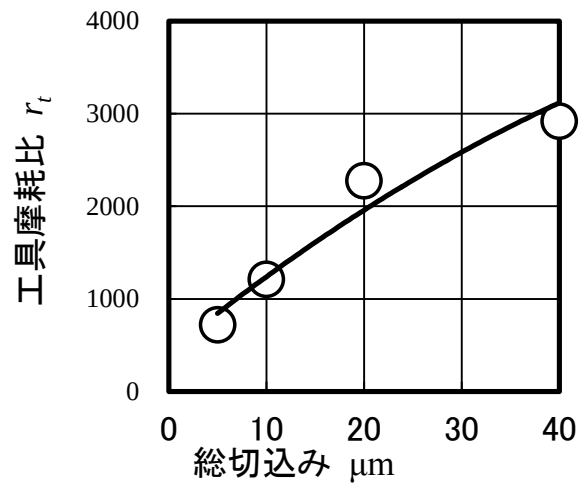
(a)単結晶ダイヤモンド



(b)多結晶ダイヤモンド(PCD)



(c)レジンボンドダイヤモンド砥石



(d)CVDダイヤモンド

図8 各種ダイヤモンド工具における工具摩耗

5. CVD-SiC 製金型の非球面切削実験

次に、図 9 に示す CVD-SiC 製の金型を切削し、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 2 に示す。工具としては先端が尖った工具（図 5(d)）を用い、 $\phi 6\text{mm}$ 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 $5\mu\text{m}$ として仕上げた。送り速度 0.1 mm/min の時の表面粗さとノマルスキー顕微鏡写真を図 10 および図 11 に示す。切削工具による切削痕が見られる。さらに送り速度を 0.04 mm/min と塩として切削加工した時の表面粗さ曲線を図 12 に示す。仕上げ研磨レベルの高精度加工が行われていることがわかる。



図 9 CVD-SiC 製の金型の外観

表 2 CVD-SiC の切削条件

金型材料		東海エンジニアリング CVD-SiC (Φ24mm)	
外径		Φ6 mm	
曲率半径		R20mm (球面)	
回転数		100 min ⁻¹	
工具		CVD ダイヤモンド	
刃数		20	
回転数		50000 min ⁻¹	
中仕 上げ	切込み	1 μm/min	1 μm/min
	送り速度	0.25 mm/min	0.1 mm/min
	切込み回数	2	2
仕上 げ	切込み	0.5 μm/min	0.5 μm/min
	送り速度	0.1 mm/min	0.04 mm/min
	切込み回数	2	2
クーラント		水 (ソリューションタイプ)	

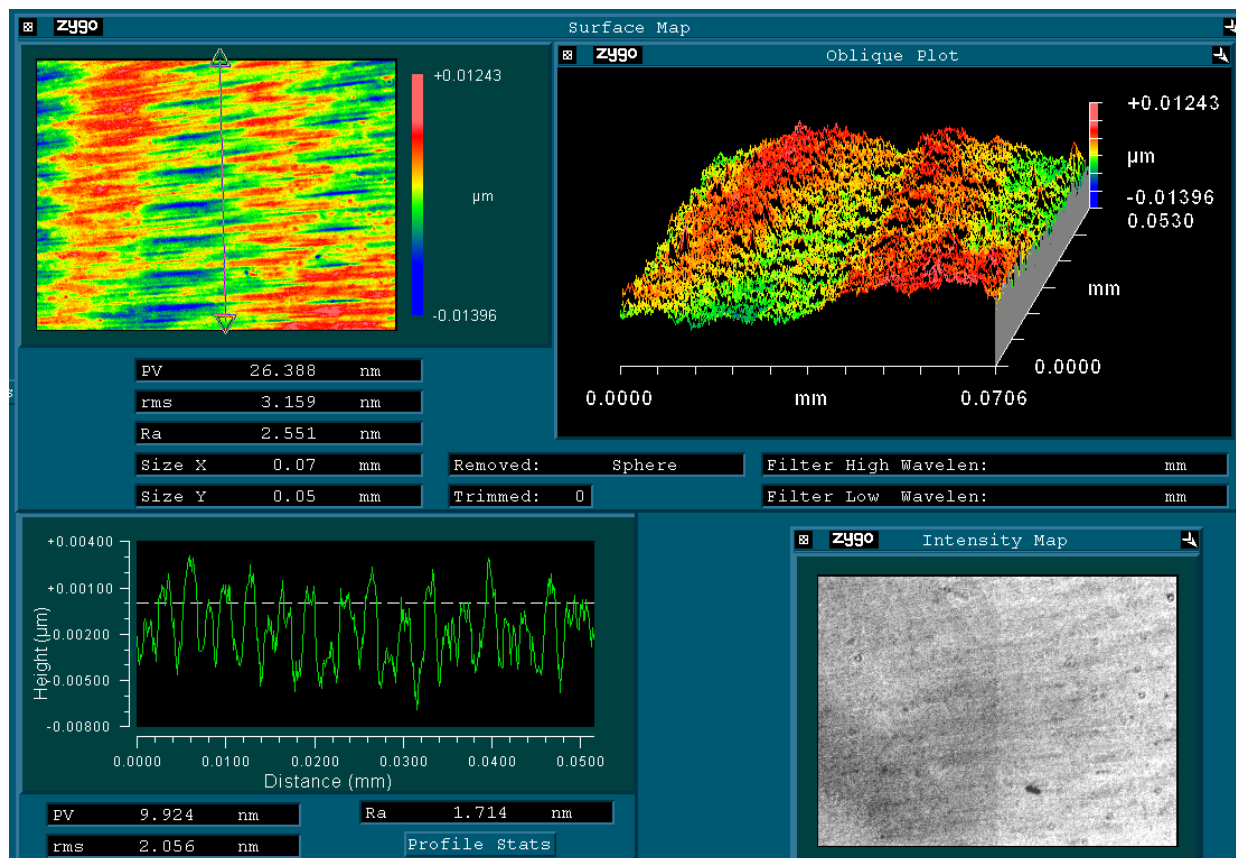


図 10 切削後の CVD-SiC の表面粗さ（送り速度：0.1mm/min）

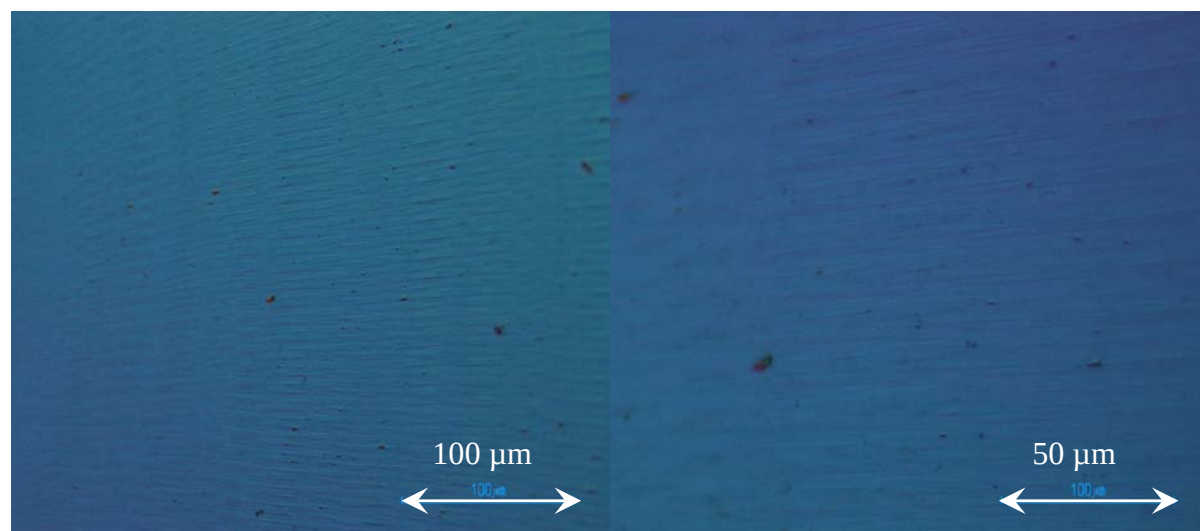


図 11 切削後の CVD-SiC のノマルスキー顕微鏡写真（送り速度：0.1mm/min）

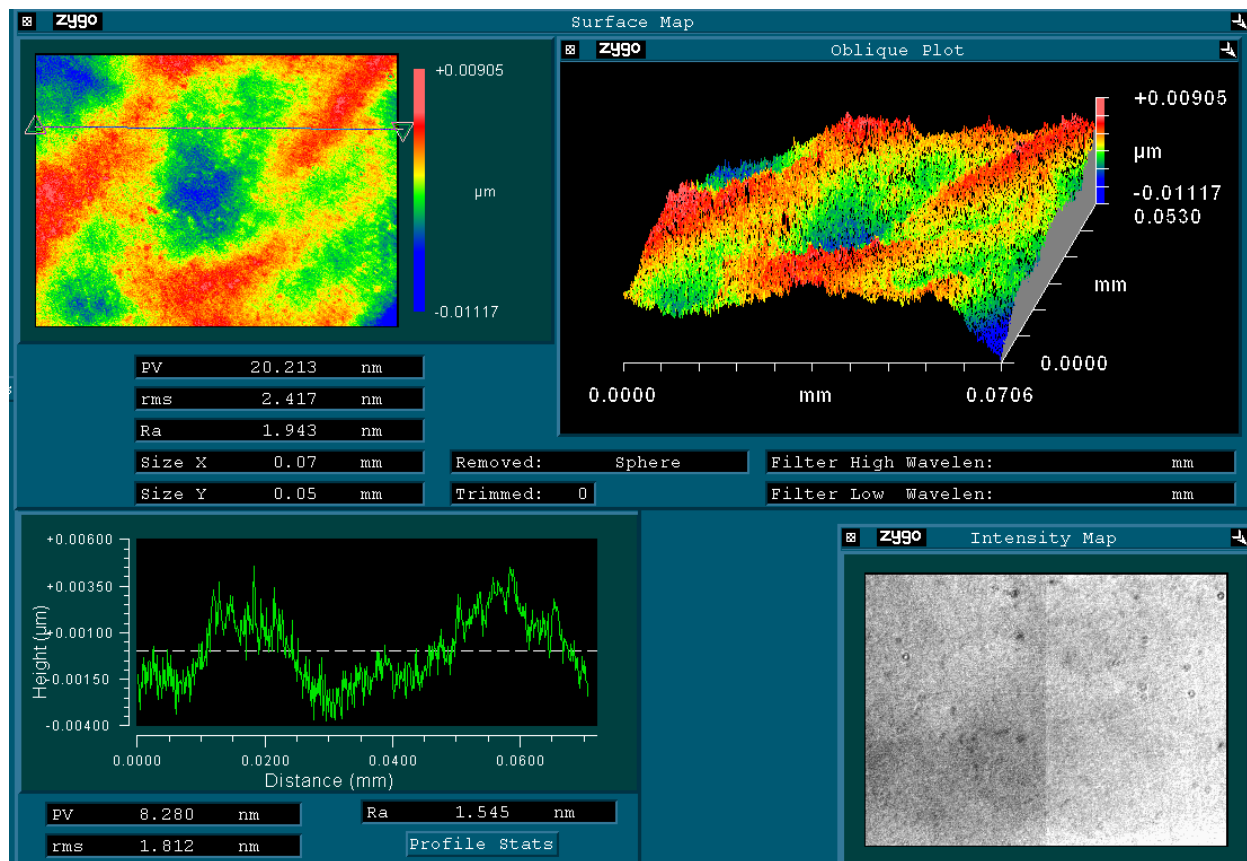


図 12 切削後の CVD-SiC の表面粗さ（送り速度：0.04mm/min）

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基礎実験により耐工具摩耗性について評価した．単結晶ダイヤモンドは従来砥石に比べて 100 倍以上の耐摩耗性があり，PCD に比べて 10 倍以上の耐摩耗性が有ることが明らかとなった⁽³⁾．

最後に，東海エンジニアリング製 CVD-SiC 製の金型を用いた非球面切削実験では，研磨レベルの超精密な表面粗さが得られることが明らかとなった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．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) 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.

- (2) H. Suzuki., T. Furuki, M. Okada, K. Fujii, T. Goto: Precision Cutting of Structured Ceramic Molds with Micro PCD Milling Tool, International Journal of Automation Technology, 5, 3 (2011) 277-280.
- (3) H. Suzuki, et.al.: Development of micro milling tool made of single crystalline diamond for ceramic cutting, Annals of the CIRP 62, 1(2013) 59–62.
- (4) H. Suzuki, M. Okada, K. Okada, Y. Ito: Precision Cutting of Ceramics with Milling Tool of Single Crystalline Diamond, International Journal of Automation Technology, 9, 1, (2015) p.26-32.