

# 単結晶ダイヤモンド製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 —ガラス基板の精密加工—

鈴木 浩文, 岡田 睦, 町田一道 (中部大学)

藤井 一二 (日進工具㈱)

スマートフォンなどの情報端末やデジタルカメラなどのニーズがますます増大し、カバーガラスの需要は現在、数億枚以上／年に達している。ガラス基板の加工は現状では電着ダイヤモンド砥石による研削加工におこなわれており、工具寿命が不十分で、定期的な交換等で非加工時間の増大、加工精度の大幅な低下の原因となっている。それに対して本提案では、さらにガラス基板の加工の高精度化・高能率化を行うために、レーザ光を用いて形状の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、ガラス基板のエッジの超精密切削を行うことを提案している。そして、実用レベルの切削加工の可能性の検証を行う。実験では、平面形状のサファイヤガラスとパイレックスガラスを用いて、マイクロフライス工具の摩耗量を評価し、溝加工テストを行い、工具摩耗と加工性状について評価し比較した。

## 1. はじめに

スマートフォンなどの情報端末やデジタルカメラなどのニーズがますます増大し、カバーガラスの需要は現在、数億枚以上／年に達している。これらのカバーガラスは、①薄板ガラスをレーザ光やダイヤモンド圧子により切断し、②切断面を電着ダイヤモンド砥石で研削・面取りを行い、③遊離砥粒を用いて研磨加工し、④両面研磨により現状では仕上げられている。しかし、この電着ダイヤモンド砥石による研削加工は、工具寿命が不十分で、定期的な交換等で効率、加工精度の大幅な低下の原因となっている。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加工を実現した<sup>1)2)</sup>。さらにガラス加工の高精度化と高能率化が求められている。

本提案では、さらにガラス基板の加工の高精度化・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、ガラス基板のエッジの超精密切削を行うことを提案する。そして、実用レベルの切削加工の可能性の検証を行う。実験では、平面形状のサファイヤガラスとパイレックスガラスを用いて、マイクロフライス工具の摩耗量を評価し、溝加工テストを行い、工具摩耗と加工性状について評価し比較した。

## 2. レーザファブリケーションによる形状創成

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1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。

$$d=d(x, y) \tag{1}$$

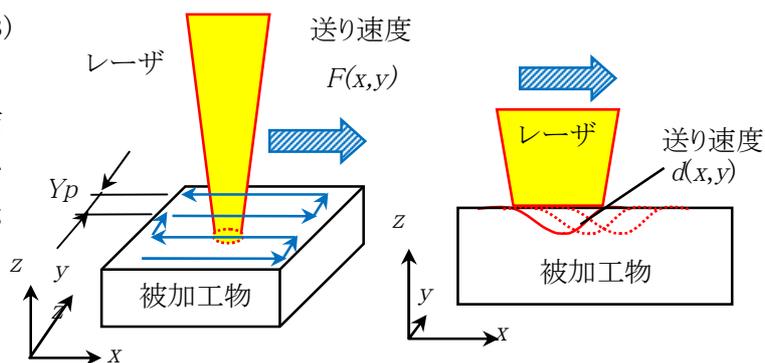
この単一加工痕を被加工面上において走査すると被加工面は重畳積分（Convolution）の原理から次式で示される除去分布の加工がおこなわれる。

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

ここで $\delta(x, y)$ 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（De-convolution）することにより、被加工面の各々のポイントにどれくらい滞留すればよいか、すなわち単一加工痕の滞留時間（Dwell）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。実際にはレーザーの滞留時間 $T(x, y)$ は各ポイント $(x, y)$ における必要な走査速度 $V(x, y)$ は $y$ 方向のピッチを $Yp$ とすると以下で表される。

$$V(x, y)= Yp/T(x, y) \tag{3}$$

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<sup>3)4)</sup>。



(a) レーザ走査 (b) 単一加工痕の重畳積分

図1 レーザ走査による自由曲面の創成

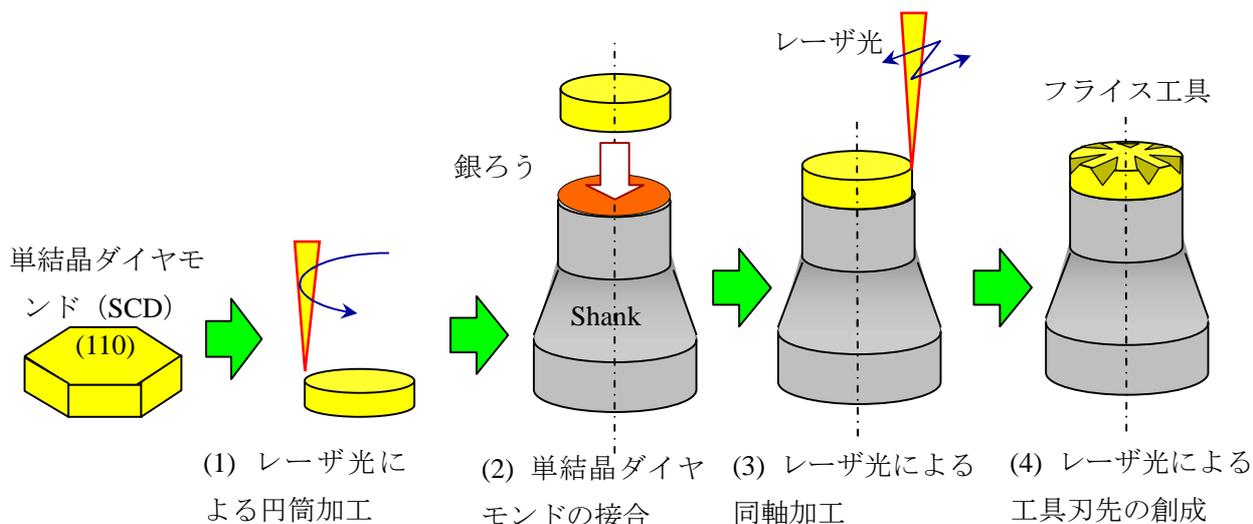


図2 単結晶ダイヤモンド製ミリング工具のレーザー加工プロセス

### 3. 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2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3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4に示す。シャンク径は $\Phi 2\text{mm}$ 、工具径は $\Phi 1\text{mm}$ で、刃数は6枚とした。すくい角は $-40^\circ$ 、逃げ角は $0^\circ$ とした。

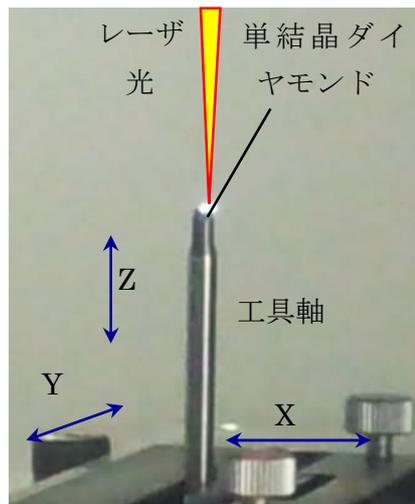


図3 レーザ加工の様子

このようなマ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5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。そのため工具温度が旋削加工のように上がらない。そのため旋削におけるバイトほど工具摩耗が大きくない。また、多刃工具であるため実切り込み量は見かけの切込量より十分に小さく、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るため、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。

表1 工具形状

工具	単結晶ダイヤモンド
外径	$\Phi 1\text{ mm}$
先端 R	0 mm
すくい角	$-40^\circ$
にげ角	$0^\circ$
刃数	6

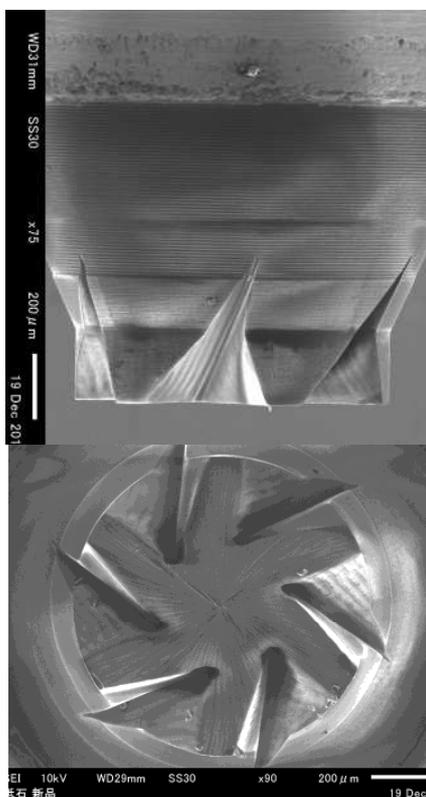


図4 試作工具のSEM写真

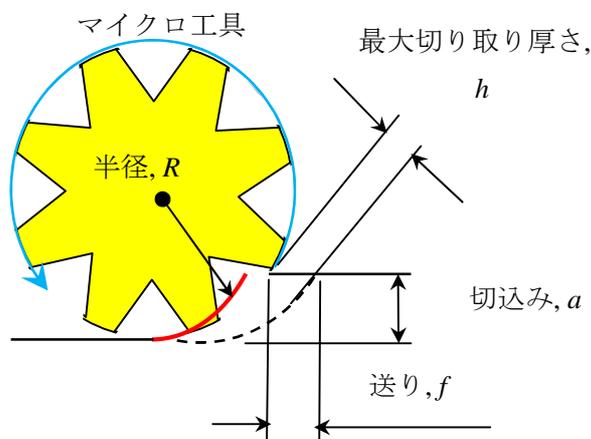


図5 フライス加工における断続切削のモデル

#### 4. 実験装置および実験方法

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サファイヤガラスやパイレックスガラスの切削実験を行った。実験の外観図を図6に示す。超精密加工機 ULG-100A (YH) 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ボールねじ駆動であり 10nm 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紋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。切削実験ではサファイヤガラスやパイレックスガラスを用いた。最初に表1の条件により溝加工創成と工具摩耗実験を行った。工具は一定の速度で回転させながら工作物を回転させた。

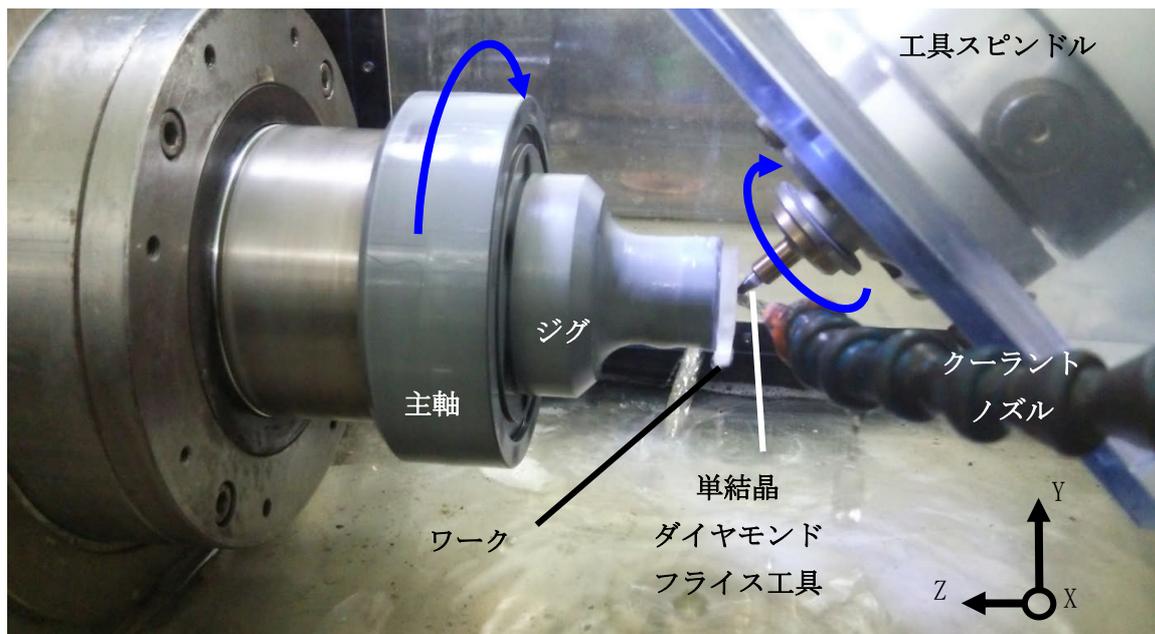


図6 サファイヤガラスやパイレックスガラスの切削実験の様子

表1 切削条件

ワーク	サファイヤ, パイレックスガラス
形状	円弧溝
深さ	20 $\mu\text{m}$ , 50 $\mu\text{m}$
外径	$\Phi 2 \text{ mm}$
回転数	50 $\text{min}^{-1}$
工具	単結晶ダイヤモンド
工具径	$\Phi 1 \text{ mm}$
回転数	50,000 $\text{min}^{-1}$
切込み	0.075~1.2 $\text{nm}/\text{回転}$
送り速度	314 $\text{mm}/\text{min}$
クーラント	ソリューションタイプ

#### 4. 切削基礎実験の結果

ここでは工具として図4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のサファイヤガラスとパイレックスガラスを切削し、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7に示すように重ね合せて、工具の摩耗量を算出した。

サファイヤガラスを切削したときのダイヤモンド工具の形状の変化を図8(a)に示す。この計測から計算した刃先の摩耗量分布を図8(b)に示す。初期において先端が尖っていたが72μmの切削加工後は35μm後退している。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サファイヤガラス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9(a)に示す。また、パイレックスガラスにおける工具摩耗比の変化を図9(b)に示す。

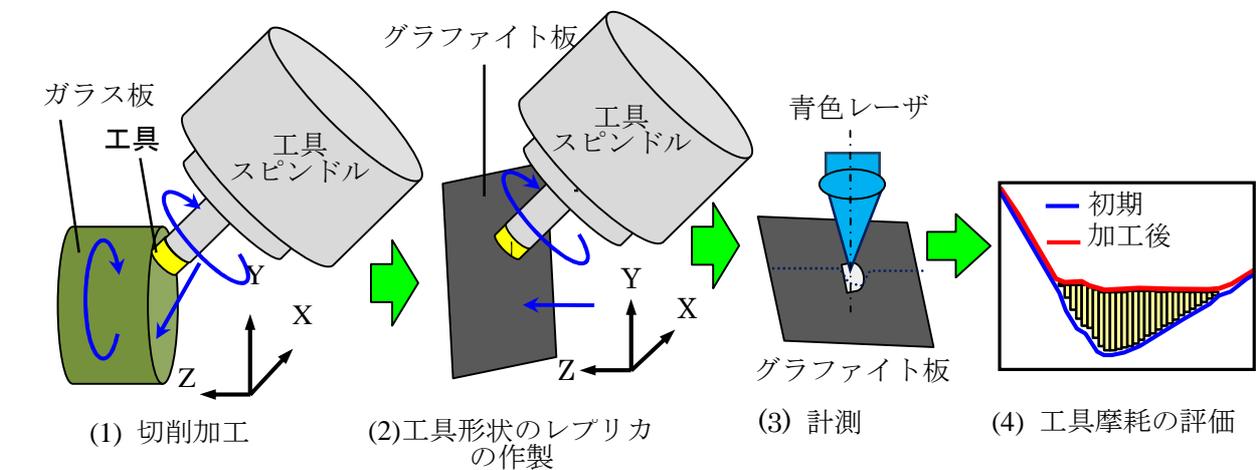


図7 工具摩耗のレプリカ測定法

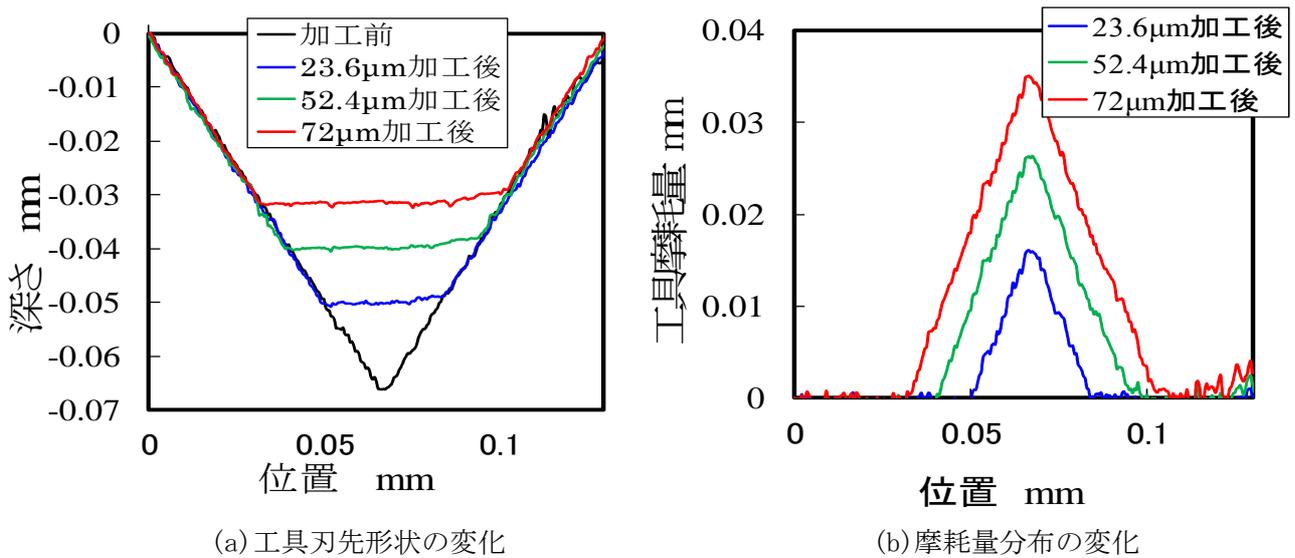
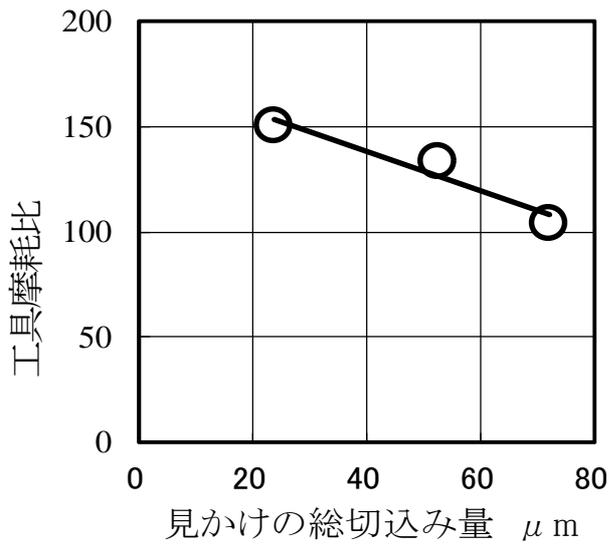
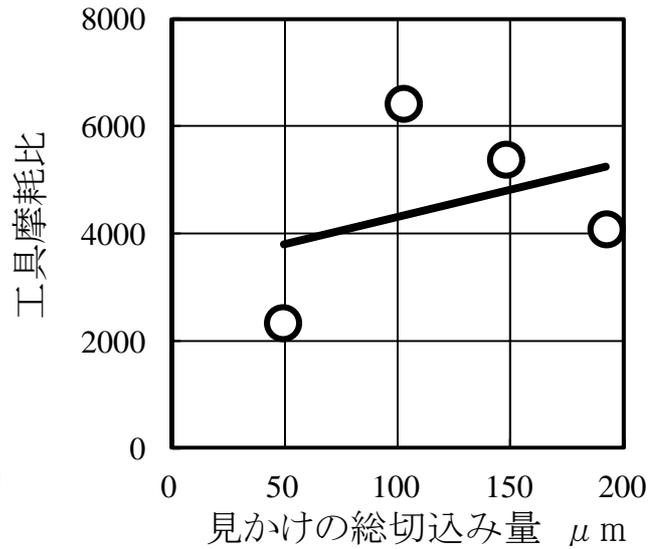


図8 サファイヤガラスを切削したときのダイヤモンド工具の刃先の摩耗の変化



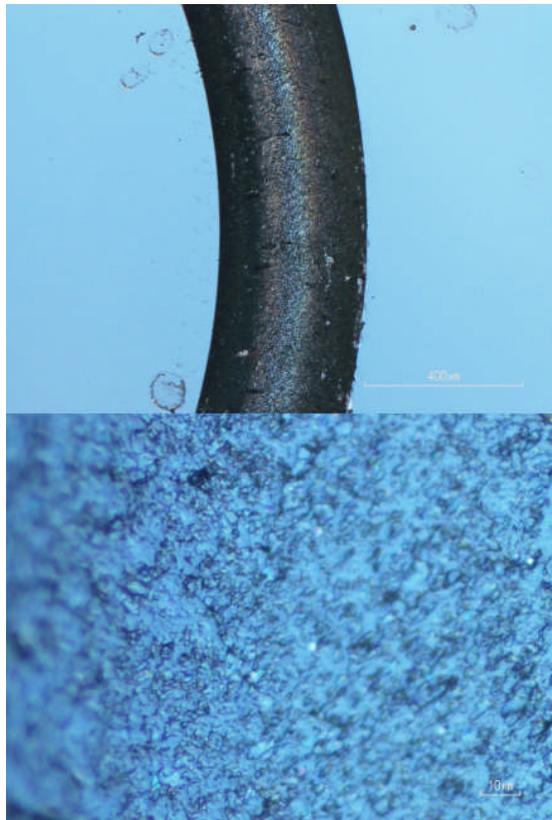
(a) サファイヤガラス



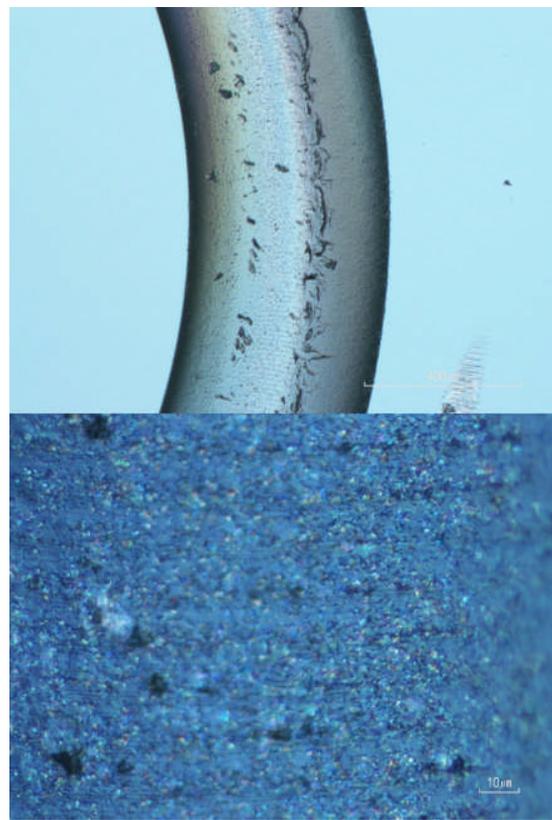
(b) パイレックスガラス

図9 サファイヤガラスとパイレックスガラスを切削したときの工具摩耗比の変化

超硬合金を単結晶ダイヤモンド製のマイクロフライス工具で切削する場合、工具摩耗比は40,000と非常に大きいのに対して、サファイヤガラスで100程度、パイレックスガラスで4,000程度しかなく、非常に摩耗が大きいことがわかる。これらの値から、本マイクロフライス工具でガラスを切削することは工具寿命、コストの観点から不利であるといえる。



(a) サファイヤガラス



(b) パイレックスガラス

図10 サファイヤガラスとパイレックスガラスを切削したときの工作物の顕微鏡写真

サファイヤガラスとパイレックスガラスに円弧形状の溝を切削したときのノマルスキー顕微鏡写真を図 10 に示す。研削加工に比べて比較的良好的な加工面であるが、まだ脆性モードであるといえる。さらに送り速度を小さくして切り込み量小さくすると表面粗さは良好になると考えられるが、加工能率の観点から現実的な切削条件とはいえない。

## 5. まとめ

スマートフォンなどの情報端末やデジタルカメラなどのカバーガラスの高精度高能率加工を実現するため、本提案では、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、ガラス基板のエッジの超精密切削を検討した。本実験では、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により平面形状のサファイヤガラスとパイレックスガラスに微細溝加工を行った。レーザ加工により試作した  $\Phi 1\text{mm}$  のマイクロフライス工具により、サファイヤガラスとパイレックスガラスを切削し工具摩耗比を測定評価したが、超硬合金などのセラミックスを切削した場合に比べて工具摩耗が非常に大きいことが明らかとなった。また溝加工テストを行い工作物の加工性状について評価したが、研削砥石による研削に比べて良好的な表面粗さが得られるものの、完全なる延性モードの加工面は得られず、加工能率の観点から、本提案のマイクロフライス工具はガラスの高能率な鏡面加工は困難であることが明らかとなった。

## 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.