

# 光学ガラスの超精密延性モード切削

慶應義塾大学理工学部機械工学科 ○石塚 潤 ◎閻 紀旺

## 要 旨

光学ガラスの超精密切削では、ダイヤモンド工具が激しく摩耗し切削が継続できないことが問題である。多くの光学ガラスの主成分が  $\text{SiO}_2$  であることから、 $\text{SiO}_2$  とダイヤモンドとの熱化学的反応が工具摩耗の支配的要因であると考えられる。そこで  $\text{SiO}_2$  を含まない光学ガラスを被削材とすることで、工具摩耗を抑制し延性モード加工を試みた。その結果、工具の逃げ面摩耗は 1/25 へと低減し、継続的な延性モード加工が可能であることが示された。

## 1. 緒論

カメラやプロジェクタなどのレンズには、透明性及均質性が高く経年劣化のしにくい光学ガラスが使用されている。そのレンズの形状としては、球面収差がなく小型・軽量化が期待できる非球面形状が求められている。

非球面ガラスレンズの加工方法にはプレス成形や研削・研磨が挙げられる。プレス成形は生産性が高いものの、高硬度・高精度な金型が必要となる上、冷却時に素材収縮が起こるため精度の維持が難しい。また、研削・研磨は高い表面品質が得られるが、非球面のような複雑な形状やフレネルレンズのような微細形状の作成は、砥石の形状やドレッシングの観点から限界がある。一方、ダイヤモンド工具による超精密切削は、制御が簡単で複雑形状を高い形状精度で加工することができる。

光学ガラスの超精密切削はこれまでも多く研究されてきた。しかし、ダイヤモンド工具が光学ガラスと熱化学的な反応をすることで激しく摩耗し、切削が継続できないことが大きな問題となっている<sup>(1)</sup>。ここで、多くの光学ガラスの主成分が酸化珪素（以下  $\text{SiO}_2$  と表記）であることから、 $\text{SiO}_2$  とダイヤモンドの熱化学反応が工具摩耗の支配的要因であると考えられる。ダイヤモンドと  $\text{SiO}_2$  を摩擦させると、化学反応によりダイヤモンドの共有結合が破壊され、摩耗することが分子動力学シミュレーションによって確認されている<sup>(2)</sup>。以上のことから、 $\text{SiO}_2$  を含まない光学ガラスを用いれば、切削時の工具摩耗を抑制できるのではないかと考えられる。

そこで本研究では、工具摩耗を抑制するために  $\text{SiO}_2$  を含まない光学ガラスを被削材として使用し、加工面に脆性破壊のない延性モード加工を試みた。具体的には、 $\text{SiO}_2$  を含まない光学ガラス S-FPL51 を選定し平面切削を行い、 $\text{SiO}_2$  を含む光学ガラス BK7 との加工特性の比較を行った。もし S-FPL51 を切削加工する上で低摩耗の延性モード切削が見つかれば、今まで実現することができなかった光学ガラスの非球面切削加工が可能になると考えられる。

## 2. 実験装置および方法

切削実験には超精密加工機 NanoformX（アメテック（株）製）を使用した。工具には単結晶ダイヤモンド平バイトを用いた。平バイトの切削モデルを図 1 に示す。平バイトによる切削において、切取り厚さ  $h$  は(1)式のように表される。

$$h = f \sin \kappa \quad (1)$$

ここで  $f$  は送り、 $\kappa$  は切込み角である。

次に実験条件を表 1 に示す。工作物半径方向に 1 mm ごとに送り量を変化させ、一度の実験で同一の工具のまま同じ実験条件を繰り返した回数を切削回数とした。また、工具すくい角の変化による加工特性を比較するため、すくい角  $0^\circ$ 、 $-20^\circ$  で実験を行った。

## 3. 結果および考察

### 3.1 加工面の表面性状

切削後のガラス表面を光学顕微鏡により観察した結果を図 2 に示す。BK7 の条件 1 の切削においては、1 回目の切削で図 2(a)

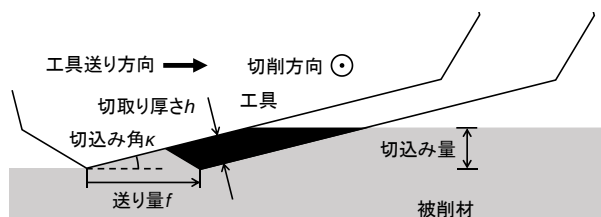


図 1 平バイトの切削モデル

に示すように表面に 100  $\mu\text{m}$  を超える大きなクラックが生じた。また、2 回目の切削で図 2(b) に示すように途中からクラックのない表面となったが、白色干渉計による表面高さの測定から、切削距離が 49 m に達した時点で切削がほぼ行われなくなったことが分かった。

S-FPL51 の条件 2 の切削においては、1 回目の切削で図 2(c) に示すような加工面にクラックが少ない延性モードに近い表面が得られた。2 回目以降の加工表面は図 2(d) に示すように数  $\mu\text{m}$  程度の小さなクラックが多数見られた。

S-FPL51 の条件 3 の切削においては、1 回目の切削では図 2(e) に示すようにクラックのない延性モードの表面が得られた。2 回目以降では図 2(f) に示すように表面に数十  $\mu\text{m}$  程度のクラックが生じた。

S-FPL51 の加工面の表面粗さを白色干渉計により測定した結果を図 3 に示す。図から分かるように、1 回目の切削では条件 3 の切取り厚さが 56 nm の時表面粗さは 33 nmSa となり、最も小さくなった。

### 3.2 工具摩耗

切削後の工具摩耗部を SEM により観察した画像を図 4 に示す。どの条件においても逃げ面摩耗が生じていることが分かる。BK7 の条件 1 の切削においては図 4(a) のように工具エッジ部分がやすく

表 1 実験条件

	条件 1	条件 2	条件 3
ガラス種類	BK7 ( $\phi 30$ )	S-FPL51 ( $\phi 50$ )	
ガラス主成分	$\text{SiO}_2$ , $\text{B}_2\text{O}_3$	$\text{SrF}_2$ , $\text{P}_2\text{O}_5$	
切込み角 $\kappa$ ( $^\circ$ )	1.69	1.72	1.99
すくい角 ( $^\circ$ )	0		-20
逃げ角 ( $^\circ$ )	7		27
主軸回転数 (rpm)	2000		
送り量 $f$ ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )	5~25		1.6~15
切削回数 (回)	2	4	
切込み量 ( $\mu\text{m}$ )	7	14	7
切削距離 (m)	57	234	767

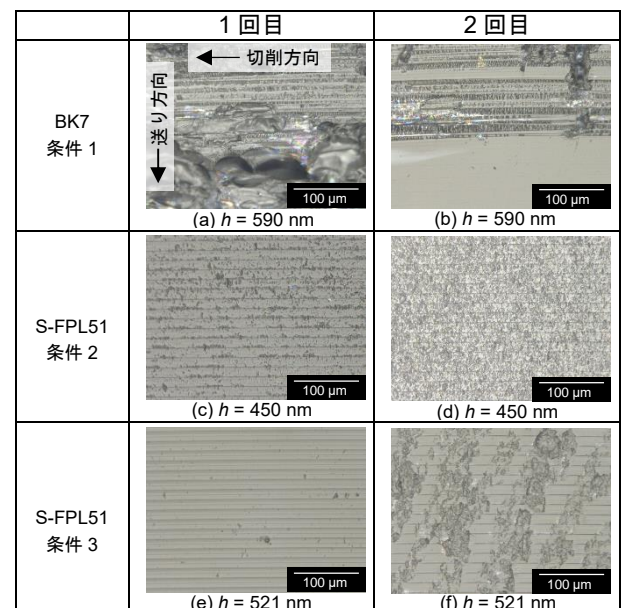


図 2 切削したガラス表面の光学顕微鏡写真

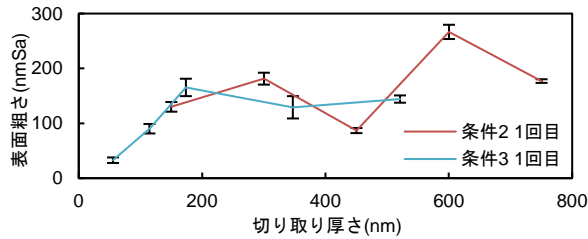
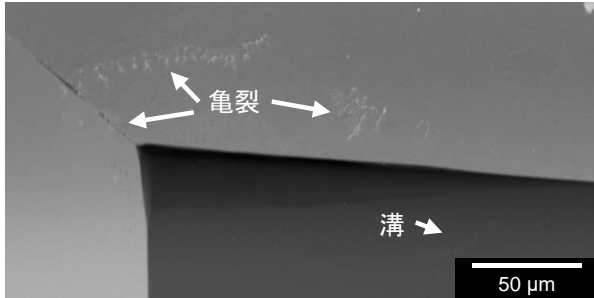
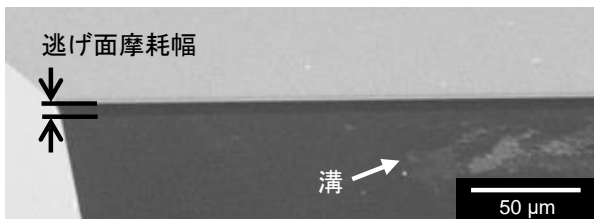


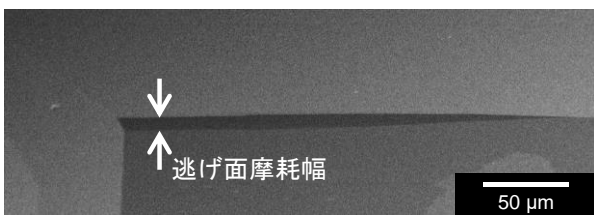
図3 切削面の表面粗さの変化



(a) BK7 条件1



(b) S-FPL51 条件2



(c) S-FPL51 条件3

図4 工具摩耗部のSEM画像

い面、逃げ面に亀裂や溝が生じた。また、S-FPL51の条件2の切削においても、図4(b)のように逃げ面に溝が生じた。一方で、S-FPL51の条件3の切削においては、図4(c)のようにき裂や溝などは確認されなかった。

次に、逃げ面摩耗幅を切削距離で除した値を刃先後退率とし、各条件における刃先後退率を比較した結果を図5に示す。同一のすくい角で切削を行った条件1と条件2において、S-FPL51の切削ではBK7に比べ、同切削距離当たりの逃げ面摩耗幅が1/25へと低減された。

### 3.3 工具摩耗による切削形態の変化

以上の結果より、工具摩耗による切削形態変化の模式図が図6に示すように考えられる。BK7の条件1の切削では図6(a)に示すように、刃先が大きく摩耗したために切り取り厚さが非常に小さくなる。そのため、切削が行われず、材料を刃先下部に押し込みながら表面を摩擦した結果、大きなクラックが生じたと考えられる。切削において絶縁体同士が摩擦するとトライボマイクロプラズマと呼ばれる微小放電が生じる。そして最も放電が生じるのは絶縁体同士が4.6 μm離れた点であることが知られている<sup>(3)</sup>。図4(a)において工具に生じた溝は摩擦接触点から4.8 μm離れた部分に発生したことから、ガラスとダイヤモンドの摩擦による放電現象の結果であると考えられる。また、2回目の表面が途中から切削されなかったのは、工具が摩耗し表面にほとんど接触しなくなったためであると考えられる。

S-FPL51の条件2の切削では、図6(b)に示すように、BK7切削時ほどの大きな工具摩耗は生じなかったために十分な切り取り厚さで切削が行われた後、工具摩耗部によって表面を摩擦し、小

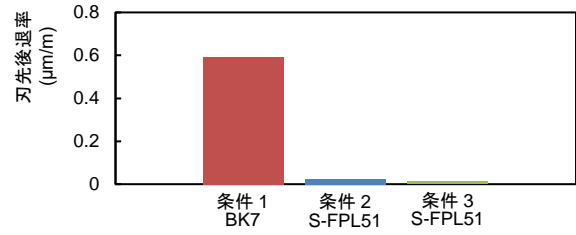
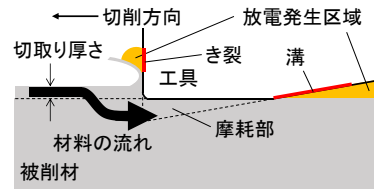
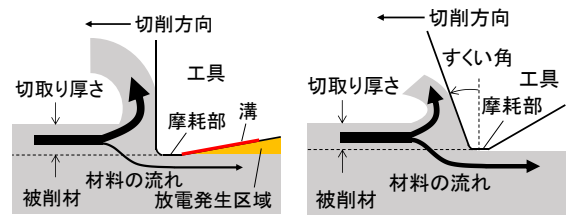


図5 刃先後退率の比較



(a) BK7 条件1



(b) S-FPL51 条件2

(c) S-FPL51 条件3

図6 工具摩耗による切削形態の変化

なクラックが生じたと考えられる。図4(b)において、工具に生じた溝は摩擦接触点から4.2 μm離れた部分に発生したことから、先ほど述べた放電現象によるものであると考えられる。

S-FPL51の条件3の切削では、図6(c)に示すように大きな工具摩耗は生じず、十分な切り取り厚さで切削が行われた後、工具摩耗部と負のすくい角によって材料の一部が表面に押し込まれて大きなクラックが生じたと考えられる。工具にき裂や溝が確認されなかったのは、負のすくい角をつけたために工具逃げ面とガラス表面との距離が大きくなり、放電現象が起こらなかったと考えられる。

以上より、S-FPL51の切削ではBK7と比較して逃げ面摩耗が低減したため、良好な加工面を継続的に得ることができることが分かった。

## 4. 結論

SiO<sub>2</sub>を含む光学ガラスBK7と含まない光学ガラスS-FPL51の切削実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) BK7の切削では工具摩耗が激しく、切削距離が49 mに達した時点で切削が中断されたが、S-FPL51の切削では継続的な延性モード切削が行われ、表面粗さ33 nmSaの表面が得られた。
- (2) S-FPL51の切削ではBK7の切削と比較して逃げ面摩耗が1/25へと低減できた。
- (3) S-FPL51の切削において精度の良い加工面を得るためには、すくい角-20°の摩耗していない工具を用いて、切り取り厚さが十分小さい条件で切削を行うのが良いことが分かった。

本研究により、SiO<sub>2</sub>を含まない光学ガラスを被削材とすることで工具摩耗を抑制し、継続的な延性モード加工が可能であることが示された。

## 参考文献

- (1) 飯塚保, ガラス切削における工具摩耗の研究 (概要), 技研所報, Vol.48, No.1(2012), pp.181-185
- (2) A.Peguiron, G.Moras, M.Walter, H.Uetsuka, L.Pastewka, M.Moseler, Activation and mechanochemical breaking of C-C bonds initiate wear of diamond (110) surfaces in contact with silica, Carbon, Vol.98(2016), pp.474-483
- (3) 中山景次, 摩擦空間のマイクロプラズマ, 真空, vol.49, No.10(2006), pp.618-623