

# 水和反応を用いた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 ○北川 大地 ◎関 紀旺

## 要 旨

単結晶ダイヤモンド工具を用いた光学ガラスの切削加工において、ガラス中の  $\text{SiO}_2$  とダイヤモンドの熱化学反応による工具摩耗が大きな問題となっている。本研究では、ガラスの水和反応に着目し、光学ガラス表面に水和層を生成しながら切削することによる工具摩耗の軽減効果を検証した。その結果、延性モード切削における工具摩耗の軽減が確認され、 $8 \text{ nm Sa}$  以下の表面粗さをもつ光学表面が得られた。

## 1. 緒論

光学ガラスは優れた光学性能を持ち、様々なレンズ形状に加工され、光学系に組み込まれている。現在、複雑形状の光学レンズを高精度、高効率で加工が可能な超精密切削技術が注目されている。光学ガラスの超精密延性モード切削を実現すれば、高速で光学表面が加工でき、コストや製作工程の削減が期待される。

単結晶ダイヤモンド工具を用いた光学ガラスの切削では、切削中の加工熱によりダイヤモンドと光学ガラス中の  $\text{SiO}_2$  との熱化学反応が促進され、ダイヤモンド内の炭素結合が破壊される<sup>[1]</sup>。そのため、工具は激しく摩耗する。この問題の1つの解決策として、被削材として  $\text{SiO}_2$  非含有の光学ガラスを用い、工具摩耗を抑制する方法が試みられている<sup>[2]</sup>。しかし、産業的に用いられている光学ガラスの多くは  $\text{SiO}_2$  を含有しており、 $\text{SiO}_2$  含有光学ガラスに対する超精密切削加工法の確立が求められている。

そこで本研究では、 $\text{SiO}_2$  含有光学ガラスの切削において、工具摩耗の支配的要因であるガラスと工具の熱化学反応を抑制するため、ガラスを水に浸けることで機械強度の低い水和層が生成される現象に着目した<sup>[3]</sup>。機械強度の低い水和層を工作物表面に生成すると加工時の切削熱が減少し、熱化学反応による工具摩耗も抑制されると考えられる。本報では、光学ガラスに対して水和層の生成を試みた後、水和層生成による切削特性や加工面形態、工具摩耗に及ぼす影響を切削実験によって検証した。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 水和層生成実験

3つの試料をそれぞれ0.25, 0.5, 6時間純水に浸け置きすることで水和層生成を試みた。水和層厚さを明らかにするため、微小押し込み硬さ試験機を用いて、押し込み荷重を4~1000 mNの範囲で段階的に変化させながら押し込み深さの変化を測定した。水和層では  $\text{SiO}_2$  と水の水和反応により、ガラス内のアルカリイオンが溶解した箇所及び  $\text{Si-O-Si}$  網目が切断された箇所に水由来の  $\text{H}^+$  及び  $\text{OH}^-$  が結合し、ガラスの構造が変化する<sup>[4]</sup>。その結果、表層の水和層は軟化するため、硬度の低下が見られた領域を水和層と定義し、純水浸け置き時間と水和層厚さの関係式を導出した

### 2.2 切削加工実験

切削加工実験の条件を表1に示す。条件1~3を用い、水和反応を利用した光学ガラスの平面切削加工を行い、比較した。加工機には超精密旋盤(Nanoform X, AMETEK 製)を用いた。切削加工の模式図を図1に示す。工具にはノーズ半径1 mm、すくい角  $0^\circ$  の単結晶ダイヤモンド R バイトを用いた。切削後の加工面観察と工具摩耗量測定にはマイクロスコープ及び2次元レーザプロブを用い、加工面の表面粗さの測定には白色干渉計を用いた。

## 3. 水和層生成実験の結果および考察

浸け置き時間の異なる3つのガラス試料について、浸け置き時間を変化させながら水和層深さを測定した結果を図2に示す。浸け置き時間を長くすることで水和層の深さが増加した。なお、水和層の生成によってガラス表面に最大14%の硬度低下が測定された。水和層生成時、ガラス中のアルカリイオンが溶出するが、この際のイオン溶解量  $Q$  は水との反応時間  $t$  を用いて次式で与えられる<sup>[5]</sup>。

$$Q = a\sqrt{t} + bt \quad (1)$$

本実験において、簡易化のために水和層厚さ  $D$  [nm] とイオン溶解量  $Q$  が対応すると仮定し、実験値をデータ解析ソフト Origin Pro を用いて定数  $a, b$  を算出した。その結果、水和層厚さ  $D$  は時

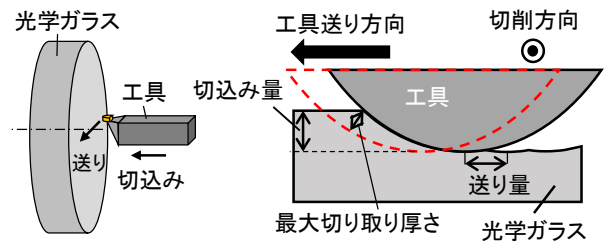


図1 加工実験の模式図

表1 切削実験 実験条件

|                   | 条件1                                   | 条件2   | 条件3  |
|-------------------|---------------------------------------|-------|------|
| 被削材               | 光学ガラス<br>( $\text{SiO}_2$ 含有率 50~60%) |       |      |
| 工具                | 単結晶ダイヤモンド R バイト                       |       |      |
| 送り量               | 5 $\mu\text{m}/\text{rev}$            |       |      |
| 切込み量              | 3 $\mu\text{m}/\text{rev}$            |       |      |
| 切削距離              | 200 m                                 |       |      |
| 最大切り取り厚さ          | 374.6 nm                              |       |      |
| 加工前処理<br>(純水浸け置き) | 無し                                    | 24 時間 | 無し   |
| 加工雰囲気             | 空気噴射                                  |       | 純水噴霧 |

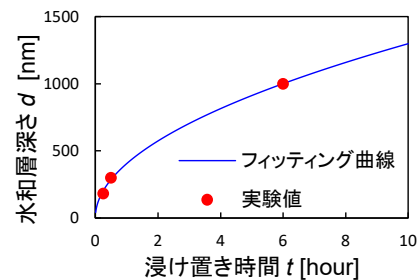


図2 純水浸け置き時間と水和層厚さの関係

間  $t$  [hour] を用いて以下のように表される。

$$D = 401\sqrt{t} + 3.19t \quad (2)$$

なお、切削点付近における高温高圧環境では水和反応が促進されるため、実際式(2)よりも速い速度で反応が進むと考えられる。

## 4. 切削加工実験の結果および考察

### 4.1 加工面の観察

図3に加工前後に測定した試料の断面プロファイルを示す。図3(a)のように、条件1の場合、特に試料外縁から約1.1 mm (切削距離 35 m) までの領域において加工面高さの急激な上昇がみられた。これは工具の摩耗により刃先が後退し、切込み量が減少したためであると考えられる。未加工面及び加工面高さの差より計算した切込み量は、切削距離に対して  $48.3 \text{ nm}/\text{m}$  の割合で減少した。図3(b), (c)に示す条件2及び条件3の場合では、切込み量減少の割合は  $5.2 \text{ nm}/\text{m}$ ,  $32.6 \text{ nm}/\text{m}$  まで抑えられ、それぞれ89%、

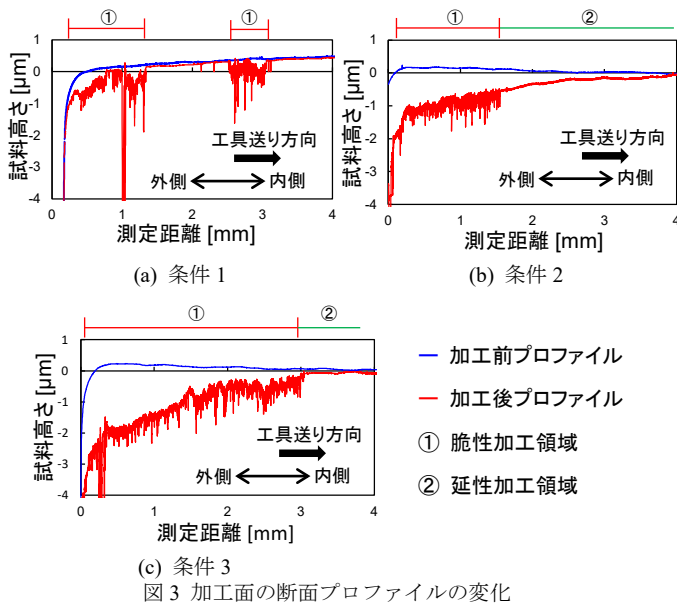


図3 加工面の断面プロフィールの変化

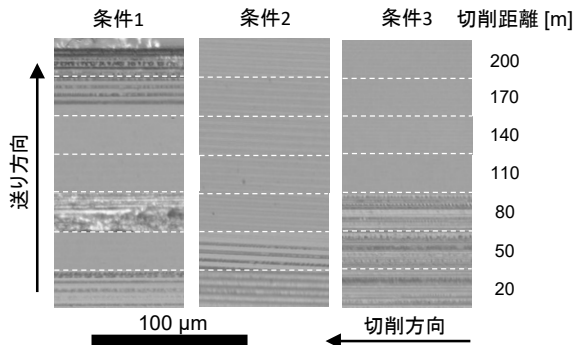


図4 加工面の比較

33%の改善がみられた。これは、水和層を生成することによって工具刃先の後退が抑制されたことを示す。さらに、図4に示す加工面の比較画像において、条件1の場合、20, 80, 170-200 mの領域で脆性加工面が確認されたが、その他の領域ではツールマークが見られず、加工が行われなかった。一方、条件2では切削距離80 m、条件3では110 mを超える領域において、クラックの無い加工面が得られた。これは、水和層によりガラス表面が軟化し、臨界切り取り厚さが大きくなったことにより、より長い切削距離で切削が行われたうえに延性モード加工が行われたことを示す。図5に条件2及び条件3で観察された延性モード加工面における表面粗さの比較を示す。これらの加工面では双方で算術平均高さ粗さ8 nm Sa以下の高い表面粗さが測定された。また、条件3において条件2よりも高い表面粗さが得られた。これは、純水を噴霧しながら加工を行うことで、切削点付近の潤滑効果などにより加工面の粗さが改善したことが考えられる。

#### 4.2 工具摩耗観察および摩耗量評価

図6に各試料切削後における工具摩耗の画像を示す。工具摩耗幅から工具刃先後退量を算出したところ、それぞれの加工における切込み減少量とほぼ一致した。工具刃先後退量を切込み量の変化が見られた切削距離で割ることで刃先後退速度を算出した結果を図7に示す。条件1では刃先後退速度が56.2 nm/mであったのに対し、条件2では9.71 nm/m、条件3では32.5 nm/mと、それぞれ85%、42%の低減がみられた。これは、水和層を生成したことでガラス表面が軟化し、機械摩耗が抑制されたのに加え、 $\text{SiO}_2$ とダイヤモンドの熱化学反応が抑制されたためであると考えられる。水和反応により、ガラス表面にはシラノール基 ( $\text{Si-OH}$ ) が生成されている。シラノール基において、酸素に結合した水素が、摩耗の要因となるガラス内の酸素とダイヤモンドの炭素が結合すること<sup>[1]</sup>を阻害するため、熱化学摩耗が抑制されたと考える。また、条件2の場合の刃先後退速度は条件3と比べて70%抑えられていた。これは、純水噴霧と浸け置き有りにける水和層の

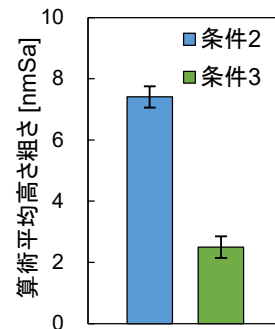


図5 表面粗さの比較

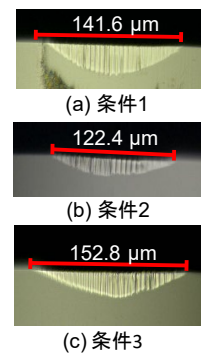


図6 工具摩耗観察

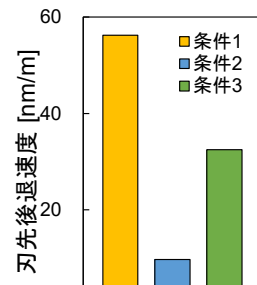


図7 刃先後退速度の比較

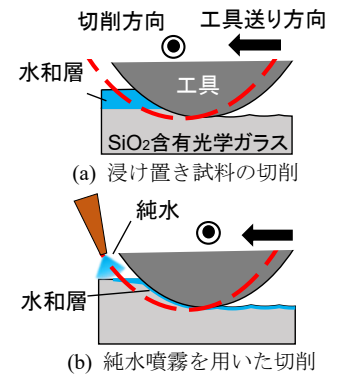


図8 水和反応を用いた切削模式図

影響が異なるためであると考えられる。両者における水和層生成及びその切削の模式図を図8にそれぞれ示す。水和層を生成するための浸け置きでは、式(2)のように長時間かけて一定の厚さまで水和層をあらかじめ生成する。一方、純水噴霧の場合、切削点付近の高温高压環境による水和反応促進を用い、瞬間的に水和層を生成する。しかし、水和層は工具先端付近のガラス表面のみ薄く生成される。今回の純水噴霧切削において、瞬間的に生成された水和層が切削中の最大切り取り厚さに比べて薄かったため、浸け置きした場合より摩耗抑制効果が弱くなったと考えられる。

#### 4. 結論

$\text{SiO}_2$ 含有光学ガラスに対し、純水を用いて水和層生成実験及び切削加工実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 純水に光学ガラスを浸け置きすることで表面にガラス硬度低下を伴う水和層が生成される。浸け置き時間が長いほど水和層が厚くなる。
- (2) 水和層を有する光学ガラスに対して切削を行うことで、より長距離の切削を行うことができ、表面粗さ8 nm Sa以下の延性モード加工面が得られた。
- (3) 水和層を有する光学ガラスに対して切削を行うことで、工具摩耗が低減した。これは、水和層によりガラスの表面硬度低下及びガラスと工具間の熱化学反応が抑制され、機械摩耗と化学摩耗の両方が抑制されたためと考えられる。

本研究より、激しい工具摩耗が問題となっていた光学ガラスの切削において、水和反応を用いることにより工具摩耗がある程度抑制されることが確認された。これは光学ガラスレンズの切削加工を実現する第1歩であり、今後も工具摩耗抑制効果の向上手法について研究を進めていく。

#### 参考文献

- [1] A. Peguiron, et al., Carbon 98 (2016) 474-483.
- [2] J. Ishizuka, et al., Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, Vol.62 No.2 (2018) 88-93.
- [3] D. R. Tajiev, R. J. Hand. Journal of Non-Crystalline Solids 356 (2010) 102-108.
- [4] 作花清夫, ガラス科学の基礎と応用, 内田老鶴圃, (1997) 108-109.
- [5] 山下勝, NEW GLASS Vol. 26 No. 3 (2011) 45-48.