シングルポイントダイヤモンド旋削による 光学ガラスの延性モード切削加工に関する研究*

小 倉 一 朗** 岡 崎 祐 一**

Ductile-Regime Machining of Optical Glasses by Means of Single Point Diamond Turning

Ichiro OGURA and Yuichi OKAZAKI

This study presents experimental results on machining of optical glasses by using ultra-precision lathe. Four machining types, which are subdivision of ductile and brittle modes, are defined for a minute description of experimental results. The machining experiment for BK7 was tested in several atmospheres. Damage-free cutting mark can be obtained within 1-micrometer tool infeed in methanol and ethanol atmosphere. An evidence for about 0.5 micrometer spring-back in BK7 was obtained from microscopic observation and experimental data. Results of the cutting several materials are presented and discussed. Comparing maximum depth of groove in the ductile mode and the critical depth of tool indentation calculated from previous theoretical analysis, it was revealed that nearly same amounts of depth are confirmed in SiC and vitreous silica, but that in BK7 is different from theoretical one in a figure.

Key words: ductile-regime machining, brittle material, glass, single point diamond, fast tool servo

1. 緒 言

非球面の基礎形状の上に微細表面形状パターンを持つような高機能光学素子を創成するためには、ぜい性材料である光学ガラスの精密切削加工技術の確立が必要である。

ガラスやセラミックスなどのぜい性材料は、ある臨界量以下に切込み深さを保って加工を行うとクラックのない延性モード加工が可能となることが知られており^{1)~3)}、現在まで様々な研究が行われている。

例えば超精密切削試験機によるシングルポイントダイヤモンド切削に関しては、シリコンとゲルマニウムの臨界切込み深さの評価⁴⁾をはじめとして、BK7と低熱膨張ガラス(Zerodur)の切込み実験⁵⁾およびF2ガラスに対する工具すくい角の影響評価⁶⁾が行われている。

また傾斜プランジカットによるシリコン、ゲルマニウムの切込み実験⁷⁾、円弧切削型試験機を用いた複数のガラスに対する臨界切込み深さの評価⁸⁾等がある。

さらに引っかかり試験の研究に関しては、SEMチャンバ内での各種ガラスに対する圧子侵入と引っかかり実験の評価⁹⁾や高静水圧下におけるシリコン、ガラスの臨界深さに関する検証¹⁰⁾等がある。

そして実験だけではなく、分子動力学シミュレーションによる計算機上での微細加工現象解明の試みもなされており¹¹⁾、実験結果との整合性が期待される。

これらの研究はぜい性材料の微細切削現象の解明へ向けたきわめて有益な結果であり、実用的切削加工を行うためにも、今後もさらに研究を進めてゆく必要がある。

ところが従来の研究で用いられてきた切削加工装置は、いずれも試験機としての性格が強く、実際の生産機械を直接目指すものではなかった。ぜい性材料の切削加工法を確立し、生産技術のブレークスルーを図るためにも、実用機をベースとした加工システムによって加工条件を

考慮した材料加工の微細メカニズムを解明する必要がある。

一方、加工対象に関して、光学素子の創成を目標とするならば、現在広く光学素子として用いられているBK7についての切削、研削実験が重要となってくるが、そのデータがいまだ乏しいという指摘がある¹²⁾。

ところで従来の研究における切込み深さに関する主要な検討対象は、臨界切込み深さの値に限られ、切込み深さと得られる切削痕深さの詳細な関係はあまり視野に入られていないようである。

もっとも、加工装置等のコンプライアンスにより、工具送り量と実切込み深さが異なる³⁾ため、実切込み深さ検出を行わない以上、切込み深さと切削痕深さの関係の評価は不可能である。しかし運動転写原理によるぜい性材料の加工技術を実用化するという観点においては、工具送り量をそのシステムにおける切込み深さととらえ、切削痕深さとの関係の評価することには意義があると考えられる。

以上にもとづき本研究では、より実用に近い高速工具サーボ搭載超精密旋盤によるぜい性材料の延性モード切削加工技術の確立を目的とする。そしてその基礎研究として、光学ガラスを中心とした各種ぜい性材料に対する切込み実験を行い、延性モードからぜい性モードへの遷移現象を調べる。

本報では延性、ぜい性加工モードをさらに細分化した4種の加工タイプの定義を行う。そして各種雰囲気下、各種試料に対して、工具切込み深さを変化させていったときの加工痕を観察し、定義した加工タイプと工具切込み深さおよび切削痕深さの関係をまとめた結果について述べる。

2. 実験の概要

2.1 高速工具サーボ搭載超精密旋盤

図1に本研究で用いた実験装置の概要を示す。これはシングルポイントダイヤモンド旋削を行うための高速工具サーボ搭載超精密旋盤である¹³⁾。

* 原稿受付 平成11年11月18日

** 正会員 機械技術研究所 (つくば市並木1-2)

高速工具サーボは圧電アクチュエータによって約 2kHz の応答帯域、約 2nm の分解能で工具切込み深さを制御できる。高速工具サーボ先端に取り付けられているダイヤモンドバイトはノーズ半径 0.2mm、すくい角 0° のものである。

実験中の主軸回転速度は 90rpm で一定とした。主軸に取り付けられた $\phi 60\text{mm}$ 用の真空チャックで試料を固定する。取り付けにともなう面傾斜については、試料が 1 回転するうちに 3 回の切込みを与え、その切削痕を確認した結果、ほぼ等しい長さであったため問題はないとした。

2.2 加工タイプの分類

ぜい性材料の加工における延性とぜい性の 2 つの加工モードは、切削痕におけるクラックなどの欠陥の有無を観察することによって判断される。

本研究では実験結果をより細かく把握するため、この 2 つの加工モードをさらに細分化した。図 2 は BK7 の切削痕をノマルスキー型微分干渉顕微鏡で観察したものである。これは 1 本の加工痕に沿って切込み深さを増加させたときの遷移の状況を示す。これより、以下の 4 つの加工タイプを定義した。

【タイプ 1】切削痕の幅が狭く、切削痕の深さも小さいもの。クラックは発生しておらず、切削痕の両側に盛り上がりが見られる。

【タイプ 2】タイプ 1 に対して切削痕の幅が急に広がるが、クラックはタイプ 1 同様存在しないもの。延性モードによる加工であり、このタイプの加工を持続することによってぜい性材料のクラックフリーの加工が可能となる。

【タイプ 3】加工痕内部に進行方向直角に細かいき裂が生じているもの。加工痕の外側にも斜め前方に細かいき裂が確認されるが、材料の脱落は見られない。

【タイプ 4】切削痕全面にわたって一様な材料の破碎・脱落が見られるもの。全面的なぜい性モードによる加工。

図 2(b) のタイプ 2 の遷移に関して興味深い結果が見られる。この図は左上から右下へ向かって切込み深さが増加して切削が進んでおり、図の中央やや右下あたりでタイプ 1 からタイプ 2 へ、そしてすぐにタイプ 3 に遷移している。

この実験中ダイヤモンドバイト先端の摩耗により、刃先が二又に分かれたような工具で切削を進めていったため、ガラス表面には 2 本の切削痕が刻まれている。タイプ 2 の切削に移行しているのは左側の筋であるが、右側の筋はタイプ 1 のまま特に影響を受けていない。これは切削条件が何らかの臨界点を越えると急激にタイプ 1 から 2 への遷移現象が生じることを示唆するものである。

2.3 実験手順

実験は以下のような手順で行った。

今回の実験で用いた加工試料は BK7、SiC、熔融石英ガラスの 3 種類である。試料を主軸に取り付け、旋盤主軸が 1 回転する間に 3 回切込みを与えた。切込み形状は主軸回転に応じて切込み深さが線形増加するのこぎり波状で、工具の送り量は $4\mu\text{m}$ に設定した。図 3 に得られる切削痕を模式的に示す。このときの切込み開始点は工具サーボと試料の初期位置によって決まる。

加工中は旋盤の x 軸を固定し、試料の一定半径位置を切込んだ。切込みを与える半径を 10~25mm としたため、半径の大きさによって切削速度が異なる。しかし最大、最小半径で切込みを行った切削痕を観察すると、加工タイプの遷移はほぼ同一の回転角度で生じていた。そのため本研究ではこの程度の切削速度の違いによる影響は無視できるものとした。

切込みを行う直前に各種の試薬を加工点にかけ、加工雰囲気を変更した。今回設定した雰囲気は、ドライ、水、ヘプタン、オクタン、メタノール、エタノール、プロパノールである。一つの雰囲気に対して切込み半径を変えた実験を 3 回行った。

切込み実験後、試料を回転ステージにのせ、切削痕の状態をノマルスキー型微分干渉顕微鏡で観察した。その際、各加工タイプの遷移点を回転ステージの角度目盛で記録した。顕微鏡で確認された切削の開始点を工具刃先の最初の切込み点とし、そこからの回転角度と指令信号から工具切込み深さを定めた。

ところでこの工具切込み深さには先にも述べたように装置のコンプライアンスの問題による試料の逃げの分

Fig. 1 Ultra-precision lathe with fast tool servo

Fig. 3 Scheme of cutting marks

Fig. 2 Machining types of cutting brittle material

(a)

(b)

Fig.4 Results of cutting experiment

が含まれている。そのためこれを試料に対する真の切込み深さであるということとはできない。この量は実際には試料や装置全体を含めた系からみた工具刃先の送り量に相当する。しかし本研究ではこれをあえて本システムにおける切込み深さとして以下の議論を進める。正確な切込み深さを求めるためには試料面の逃げ量を測定する必要があるものの、測定システムの構築などの困難さがある。そのためこの問題は次の機会に譲ることとする。

続いて触針式粗さ計(Rank Taylor Hobson 社製 TalyScan)を用いて切削痕深さを観察した。粗さ計の触針先端半径は $5\mu\text{m}$ 、最小分解能は 3nm である。顕微鏡観察時に記録したステージの回転角を用いることにより、工具切込み深さに応じてどのような加工タイプが出現し、そのときの切削痕深さはどうなっているかを関連づけることができる。

以上の実験を上にあげた各種の雰囲気、試料について行い、各加工条件が加工結果に与える影響を調べた。

3. 実験結果

3.1 加工雰囲気の影響

図4に切削実験結果の一例を示す。これは試料をBK7、加工雰囲気を(a)はドライ、(b)はヘプタンとしたものである。これらの結果は、半径別に3回切削実験することで得られた条痕についてまとめたものである。これらの各点で観察された加工タイプを種類別にプロットしている。

このグラフにおいてx軸は、工具刃先と試料表面の接触点からの工具切込み指令信号によって定めた切込み深さである。またy軸は、粗さ計で測定した切削痕深さである。

グラフ中の直線は $y=x$ であり、この直線上の点は工具切込み深さと切削痕深さが一致していることを意味する。(a)、(b)共にタイプ4に至るまでプロットされた点は $y=x$ の下側にある。これは各切込み深さに対して得られた切削痕の深さが常に小さいことを示す。その原因は工具先端から工具サーボ、旋盤、チャック、試料へいたる装置のコンプライアンスによるものと考えられる。

図4(a)、(b)における加工条件の違いは加工雰囲気のみであるが、その結果には際立った相違がみられる。

まず(a)の雰囲気ドライの場合、工具が試料に接触してから切込み深さ $1\mu\text{m}$ までの間において、同一の切込み深さであってもタイプ1~3が混在して発生しており、各加工タイプの発生には関連性が見られない。またその切削痕深さにもばらつきが大きい。

これに対して(b)の雰囲気ヘプタンの場合は、各タイプ

Fig.5 Cutting model for two machining types

の遷移が明りように確認できる。タイプ2が切込み深さ $0.5\sim 1.2\mu\text{m}$ の間で単独に得られており、その切削痕深さと切込み深さにほぼ一対一の関連性が見られる。これは延性モードの切削加工が安定に得られていることを意味する。

タイプ1とタイプ2が切込み深さ(図中x軸方向) $0.1\sim 0.5\mu\text{m}$ の間で混在しているが、両者の切削痕深さ(y軸方向)には $0.5\sim 0.7\mu\text{m}$ の差がある。これは同一の切込み深さに対して異なる加工タイプが出現していることを示す。この結果は雰囲気を変えた場合においても確認された。

これより、タイプ1の場合、試料は工具の下に潜り込んでから再び弾性回復をおこし、塑性変形のみだけが切削痕として残るが、ある臨界点を越えると切りくずがすくい面に沿って流れ出してタイプ2となる可能性が推察できる。この様子を概念的に図5に示す。これは先の加工タイプの分類において、タイプ1からタイプ2への遷移を顕微鏡で観察したものに符合する。

各種雰囲気下で得られた結果を図6にまとめて示す。(a)は各切込み深さに対して発生した加工タイプの別を示したもので、図4におけるx軸方向と加工タイプの関連性をまとめたものに相当する。これは本システムでどの程度の切込み深さで加工タイプが遷移するかを意味している。

図6(a)より次の結果が確認できる。ドライでは $0.2\mu\text{m}$ 以上の切込み深さになると加工モードが混在して発生し、安定な切削は望めない。加工雰囲気を水にした場合、タイプ2の加工痕が存在する切込み深さ自体は $1.5\mu\text{m}$ ほどの幅を持っているが、その範囲では同時にタイプ1あるいはタイプ3が現れており、タイプ2は単独では得られない。

これに対しヘプタン、オクタン、メタノール、エタノールでは安定にタイプ2で切削できる切込み深さが存在する。特にメタノール、エタノールでは切込み深さ $0.2\sim 1.2\mu\text{m}$ の範囲にわたっており、実用的にガラスを延性モ

Fig.6 Machining types under various atmospheres

ードで切削加工する可能性が伺える。ところが雰囲気と同じアルコール系のプロパノールになると、切込み深さが $0.25\mu\text{m}$ 以上でタイプ3の切削が発生し、タイプ2のみが得られる範囲がかえって狭まり安定な加工の継続には問題がある。

図6(b)は得られた切削痕深さと加工タイプの別を示したもので、図4のy軸方向との関連性に相当する。

雰囲気がドライの場合、タイプ2の発生する切削痕の限界の深さは $0.2\mu\text{m}$ までであったが、それ以外の雰囲気では $0.3\mu\text{m}$ 以上までとなっている。またクラックの存在するタイプ3を生じる切削痕深さについても、雰囲気による違いが認められる。ドライの場合、切削痕深さが $0.06\mu\text{m}$ になるとタイプ3がすでに発生しているが、雰囲気が水、プロパノールでは約 $0.15\mu\text{m}$ 、ヘプタン、オクタン、メタノール、エタノールの場合 $0.2\mu\text{m}$ の深さまでは欠陥が生じていない。

以上により、加工雰囲気が試料表面に影響を及ぼし加工の状況に変化を与えていることが確認できた。そして今回の実験結果の範囲では、試料BK7において、雰囲気メタノール、エタノールでもっとも望ましい切削加工が行われることがわかった。

3.2 加工対象による違い

加工対象を変えた場合の加工結果の違いについて調べた。図7にその結果を示す。これは加工雰囲気を水としてBK7、SiC、熔融石英ガラスの各試料を切削したものである。これを見ると各試料の種類によってそれぞれ特徴的な結果が得られていることがわかる。

まず、図7(a)のBK7については、先の実験で得られたように切込み深さと切削痕深さに明確な関連性が見られる。タイプ1、3との混在があるものの、タイプ2の切削は切込み深さ $0.2\sim 1.5\mu\text{m}$ の間でそれにほぼ比例した深さの切削痕が得られている。

次に試料をSiCにした場合、図7(b)に示すように切込み深さを大きくしても切削痕深さが増大しない状況が確認できる。タイプ2の切削痕の深さは $0.3\mu\text{m}$ 以上のものまであるが、それを与える切込み深さは $0.7\sim 1.7\mu\text{m}$ の範囲であり、BK7の半分程度しかない。また同一の切込み深さによって生ずるタイプ2の切削痕深さには大きなばらつきが見られる。

図7(c)の試料が熔融石英ガラスの場合は、材料の破壊が

Fig.7 Experimental results of several materials

Table 1 Characteristics of test materials and calculated d_c

Materials		BK7	SiC	Vitreous silica
Fracture toughness	K_{IC} MPa m ^{1/2}	0.2	4	0.75
Young's modulus	E GPa	81.5	420	70
Hardness	H_V GPa	5.1	24	6
Critical depth of cut	d_c μ m	0.025	0.49	0.18

切込み深さの小さいときから始まっている様子がわかる。得られた結果は大きくぜい性破壊しているタイプ4が主流であり、タイプ1, 2のクラックフリーの加工は切込み深さ、切削痕深さともごく小さい範囲でしか存在していない。

また、SiC、熔融石英ガラスについては、BK7にあったようなタイプ1と2の深さについての不連続性があまりみられなかった。

以上の結果から、上記3種類のぜい性材料の中ではBK7が最も加工しやすく、SiCおよび熔融石英ガラスをクラックフリーで加工することは困難であることがわかる。

この結果について以下の考察を加えてみた。

Griffithのき裂伝播の解析により、延性—ぜい性遷移臨界押込み深さ d_c は次の式で与えられる¹⁾。

$$d_c \approx \frac{E}{H_V} \left(\frac{K_{IC}}{H_V} \right)^2 \quad (1)$$

ただし

E ; ヤング率, H_V ; ビッカース硬さ, K_{IC} ; 破壊じん性値である。

表1に今回の実験で用いた各試料の破壊じん性値、ヤング率、ビッカース硬さおよびそれらの値から計算された臨界深さを示す。

今、切削痕深さを真の切込み深さに対応するものと考え、SiCおよび熔融石英ガラスに関してはタイプ2の切削痕深さの最大値は計算された d_c に近いものとなっている。一方でぜい性破壊をおこしているタイプ3は d_c より小さい値で生じている。しかしこの d_c 値は圧子押込みに関するものであり、加工における臨界値はこれよりかなり小さくなる。たとえば研削加工を行う場合の臨界切込み深さは臨界押込み深さの15%程度に見積もられているため、本実験の結果は妥当性をもっていると思われる。

これに対してBK7の臨界押込み深さ d_c は0.025 μ mとかなり小さい。この値は図7(a)のタイプ1の切削痕深さにしか相当せず、タイプ2の最大の切削痕深さが約0.2 μ mであることを見ると一けた異なる。

しかしながらすくい角 -45° 、切削速度20m/sの場合、BK7の切削時における臨界切込み深さが0.25 μ mになるという報告もなされている⁷⁾。本実験で得られた結果はこちらの値に近く、BK7の切削時における臨界切込み深さは圧子押込みの場合に対し大きい値をとる可能性がある。

4. 結 言

ぜい性材料の運動転写原理による加工の実用化を目指すため、光学ガラスBK7および各種ぜい性材料を高速工具サーボ搭載超精密旋盤によるシングルポイントダイヤモンド旋削の加工実験を行い、延性モードからぜい性モードへの遷移現象について調べた。本研究の内容をまとめると以下ようになる。

- (1) ぜい性材料における延性、ぜい性モードの2つの加工モードを切削痕の状態から4つの加工タイプに細分化した。
- (2) 装置のコンプライアンスの影響により、タイプ4になるまで切削痕深さは常に切込み深さより小さくなった。
- (3) BK7を試料とした加工実験の結果、同一の切込み深さであってもタイプ1と2では切削痕の深さが異なることを観察した。これはガラスの弾性回復によるものと考えられる。
- (4) 各種の加工雰囲気下での切削加工実験を行った。加工雰囲気をメタノール、エタノールにすると切削痕深さが0.2 μ m、本システムによる切込み深さが1.2 μ mまで安定した加工が得られる。
- (5) 加工対象によって特徴の異なる加工結果を得た。BK7は加工しやすいが、SiCおよび熔融石英ガラスでクラックフリーの加工を行うことは難しい。SiC、熔融石英ガラスの実験によって得られたタイプ2の最大の切削痕深さは計算される臨界押込み深さに近いものとなったが、BK7については一けた大きい値を得た。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、山梨県工業技術センターの西村通善氏、韓国釜山大学校の林漢錫氏のご協力を得ました。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) T. Bifano, T. Dow and R. Scattergood: Ductile Regime Grinding: A New Technology for Machining Brittle Materials, ASME, J. Eng. Ind., **113**, 5, (1991) 184.
- 2) 宮下政和; ぜい性材料の延性モード研削加工技術—ナノ研削技術への道, 精密工学会誌, **56**, 5, (1990) 782.
- 3) 谷 泰弘; 延性モード加工, 生産研究, **43**, 11, (1991) 472.
- 4) P. N. Blake and R. O. Scattergood: Ductile-Regime Machining of Germanium and Silicon, J. Am. Ceram. Soc., **73**, 4, (1990) 949.
- 5) P. A. McKeown, K. Carlisle, P. Shore and R. F. J. Read: Ultra-precision, High Stiffness CNC Grinding Machines for Ductile Mode Grinding of Brittle Materials, 精密工学会誌, **56**, 5, (1990) 806.
- 6) 山田 収, 西口 隆, 榊田正美, 内田浩二: ガラスの臨界切込み深さに及ぼす工具すくい角の影響, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 751.
- 7) E. Brinksmeier, W. Preuß and O. Riemer: From Friction to Chip Removal. An Experimental Investigation of the Microcutting Process, Proc. 8th Intern. Prec. Eng. Seminar, (1995) 335.
- 8) M. G. Schinker: Subsurface Damage Mechanisms at High-Speed Ductile Machining of Optical Glasses, Prec. Eng., **13**, 3, (1991) 208.
- 9) 江田 弘, Lotfi Chouanine, 清水 淳: ガラス引っかけ過程の延性発現の検証—鋭利なダイヤモンド圧子を用いた場合—, 精密工学会誌, **64**, 4, (1998) 613.
- 10) 吉野雅彦, 青木隆幸, 杉島泰介, 白樫高洋: 高静水圧環境下における硬ぜい材料の引っかけ加工試験, 精密工学会誌, **65**, 10, (1999) 1481.
- 11) 島田尚一, 田中宏明, 井川直哉: 分子動力学による単結晶シリコンの微小加工機構の解明, 1999年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1999) 203.
- 12) 江田 弘, 山本佳男, 秋山貴信, 石原浩輔: セラミックスとガラスの多目的延性モード加工機械の開発, 精密工学会誌, **62**, 2, (1996) 236.
- 13) 岡崎祐一: ダイヤモンド旋削による微細表面形状の創成, 真空, **40**, 6, (1997) 541.