

ゴム砥石を用いた光学ガラスレンズの延性モード研削加工に関する基礎的研究

慶應義塾大学 ○川名雄也 ◎柿沼康弘

要旨

一眼レフや天体望遠鏡に代表される大口径ガラスレンズは研削加工後、研磨加工工程を経て要求される加工面品位を得ている。しかし、研磨加工工程は加工に長い時間を要する。そこで本研究では、クラックレスで高効率な研削加工を目的とし、ゴム砥石を用いた球面ガラスの延性モード研削における加工特性を評価した。具体的には、ゴム砥石硬度・ホイール一回転あたりの砥粒切込み深さが加工面品位に与える影響を実験的に調べた。

1. 結論

一眼レフや天体望遠鏡に代表される大口径ガラスレンズの需要が高まっており、光学レンズを高精度かつ高効率に製造することが求められている。多くの生産現場では、生産性の観点から、マイクロクラックの発生を許容し、研削加工により形状を作製した後、十分な研磨加工を行うことで、生じたマイクロクラックを取り除いている。しかしながら、研磨加工工程に伴う形状精度の低下、加工時間・コストの増加が問題となっているため、マイクロクラックのない延性モード研削加工を高効率に行うことが求められている。本研究では研削加工の高効率化を目的として、工具材質に着目する。従来、研削加工にはレジンボンド砥石が用いられているが、工具弾性の観点から、レジンボンド砥石に比べ低い弾性を有するゴム砥石を用いることで加工負荷低減を図る。特に、ゴム砥石の硬度・ホイール一回転あたりの砥粒切込み深さが加工面品位に与える影響を実験的に調べ、ゴム砥石を用いた BK7 球面ガラスの延性モード研削加工特性を明らかにした。

2. 実験方法

Fig.1 に示すように、直径 100 mm ゴム砥石のホイール及び被削材の直径 30 mm の光学球面ガラス BK7 を超精密加工機(ULG100C)に取り付け、ホイールを被削材の外周部から中心に向かって送ることで、加工を行った。高効率化のために本実験における研削加工方法は、ホイールと被削材の周速ベクトルが直交するクロス研削加工法を用いた。Table 1 に示す条件の下、粒度#1000 の高硬度のゴム砥石と、その約 1/2 の硬度の低硬度ゴム砥石を用いて研削を行い、ホイール送り速度及びゴム砥石の硬度が加工面品位に与える影響を調べた。また、粒度#2000 の低硬度ゴム砥石を用いて Table 1 に示す加工条件の下、加工を行い、ホイール一回転あたりの最大砥粒切込み深さと研削モードの関係性を明らかにした。

3. 砥石硬度の影響

Fig.2 に高硬度ゴム砥石を用いた際の、各ホイール送り速度における被削材中心からの距離と表面粗さ Ra の関係を示す。結果から、ホイール送り速度が低いほど表面粗さの値は小さくなった。これは、ホイール送り速度が低くなると、ホイール一回転あたりの砥粒切込み深さが小さくなるため、加工負荷が低減したことに起因する。また、研削加工点が被削材中心からの距離が長くなると表面粗さの値が大きくなった。これは、研削加工点が被削材中心からの距離が長くなると被削材周速度が高まり、加工負荷が大きくなったことが原因である。

続いて、Fig.3 に低硬度ゴム砥石を用いて加工した際の、研削加工点の被削材中心からの距離と表面粗さ Ra の関係を示した。Fig.2 と比較すると、砥石の硬度が低い方が表面粗さの値は大きい値となった。しかしながら、Fig.4 に示すように、低硬度ゴム砥石の方がマイクロクラックの少ない良好な加工面が得られた。これは、低硬度ゴム砥石の方が弾性率が低いいため、加工時の瞬間的な撃力を吸収したものと考えられる。

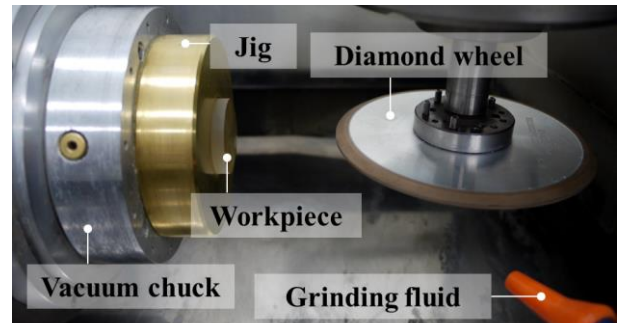


Fig.1 Experimental setup

Table1 Grinding condition

Depth of cut	0.5 μm
Wheel Feed rate	0.10, 0.25, 0.50, 1.0, 3.0 mm/min
Workpiece rotation	10 min^{-1}
Wheel rotation	7000 min^{-1}

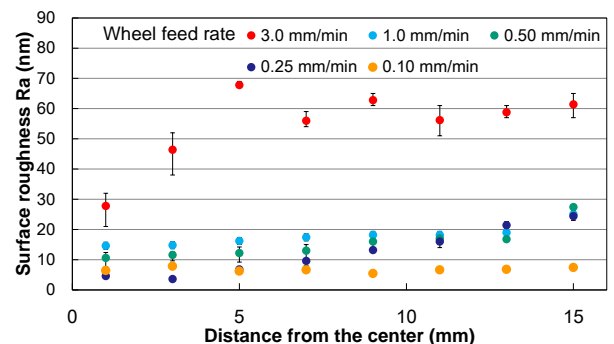


Fig.2 Surface roughness Ra in grinding with hard rubber bonded wheel (Abrasive size #1000)

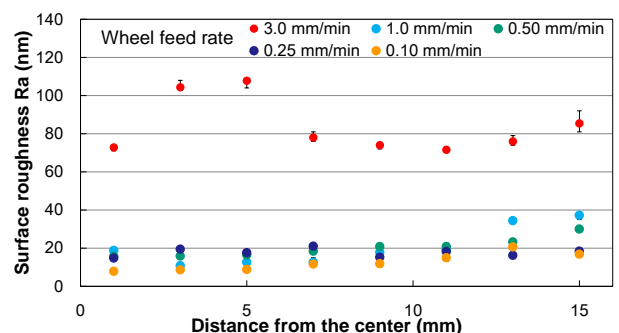
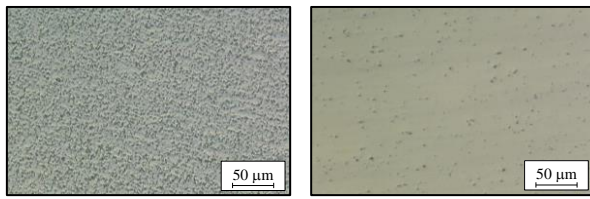


Fig.3 Surface roughness Ra in grinding with soft rubber bonded wheel (Abrasive size #1000)



(a)Hard rubber bonded (b)Soft rubber bonded

Fig.4 Machined surface at 3 mm from center of the workpiece at the feed rate of 1.0 mm/min

以上より、本研削条件においてゴム砥石を使用する際には、低硬度ゴム砥石を用いることで、マイクロクラックの観点から加工面品位が高まることがわかった。また、ホイール一回転あたりの砥粒切込み深さが加工面品位に影響を与えることが考えられるため、次に、粒度#2000の低硬度ゴム砥石を用いて加工を行い、砥粒切込み深さの検討を行った。

4. 砥粒切込み深さの影響

粒度#2000の低硬度ゴム砥石を使用し、ホイール送り速度を0.10~3.0 mm/minの範囲で変化させて加工を行った。

Fig.3, Fig.5を比較するとホイール送り速度に関わらず、粒度#2000のゴム砥石の方が表面粗さの値は小さいことがわかる。これはホイール一回転あたりの砥粒切込み深さが小さいことに起因する。Fig.6に示すように、粒度#2000の低硬度ゴム砥石においてはホイール送り速度0.5 mm/min以上のとき加工面にマイクロクラックが生じていることがわかる。また、ホイール送り速度0.25 mm/min以下のとき被削材全面でマイクロクラックのない延性モード研削となり、高品位な加工面が得られた。これらの加工時の研削モードはホイール一回転あたりの砥粒切込み深さによって決定される。そこで、ホイール一回転あたりの最大砥粒切込み深さを検討した。最大砥粒切込み深さ h_m [nm]は式(1)で表される。#2000における単位面積あたりの砥粒数 C を 16.6 mm^{-2} 、係数 r を10とする。ホイール直径 d_w を100 mm、ホイール送り速度 v_w を0.10~3.0 m/s、ホイール回転速度 v_s を36.7 m/s、切込み深さ a_p を $0.5 \mu\text{m}$ とする。

$$h_m = \left[\frac{4}{Cr} \cdot \frac{v_w}{v_s} \cdot \left(\frac{a_p}{d_e} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (1)$$

粒度#2000の低硬度ゴム砥石を用いたときTable 2に示すように、最大砥粒切込み深さ2.31 nm以上のとき脆性モード研削となり、1.15 nm以下のとき延性モード研削が得られることがわかった。

以上の最大砥粒切込み深さの検討から、高精度・高能率化に向け、Table 3に示すように、被削材中心からの距離に応じて送り速度を変化させることで、被削材全面の延性モード研削を高能率に得られる可能性を示した。今後、クロロブレンゴムとは異なるボンド材のゴム砥石を評価し、適したゴム砥石の特性を明らかにする計画である。

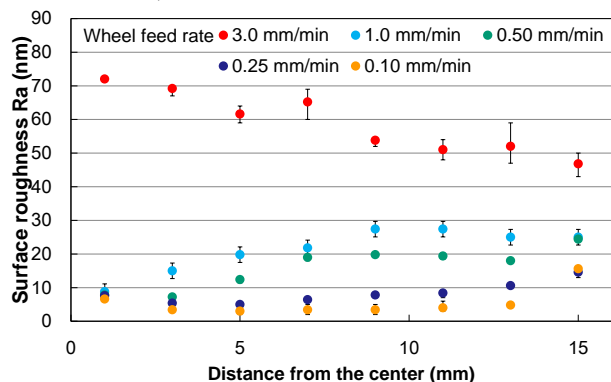
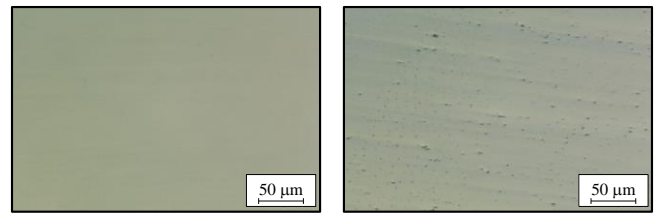


Fig.5 Surface roughness Ra in grinding with soft rubber bonded wheel(Abrasive size #2000)



(a)Feed rate of 0.25 mm/min (b)Feed rate of 0.5 mm/min
Fig.6 Machined surface at 15 mm from center of the workpiece

Table 2 Relation between the maximum chip thickness and grinding mode

The maximum chip thickness h_m nm	Grinding mode of the workpiece circumstance
0.73	Ductile mode
1.15	Ductile mode
1.63	Brittle ductile traditional area
2.31	Brittle mode
4.00	Brittle mode

Table 3 Relation between feed rate in ductile mode grinding and distance from the center of the workpiece

Radius mm	0~1	1~3	3~15
Depth of cut μm	0.5	0.5	0.5
Wheel feed rate mm/min	1.0	0.5	0.25
Workpiece rotation min^{-1}	10	10	10
Wheel rotation min^{-1}	7000	7000	7000

5. 結論

光学ガラスBK7の非球面レンズの高能率研削加工を実現することを最終目的とし、本研究では、ゴム砥石を用いた球面ガラスの研削加工特性を評価した。

具体的には、砥石の硬度・ホイール一回転あたりの砥粒切込み深さが加工面品位に与える影響を実験的に調べた。実験結果に基づき、ゴム砥石を用いた際の延性モード研削が可能な砥粒切込み深さを明らかにし、送り制御による高能率な研削加工法を提案した。以下に得られた結果を示す。

- 1) ホイール送り速度0.10~3.0 mm/minの範囲で加工を行ったところ、ホイール送り速度が低いほど加工面品位は高まることがわかった。これは、ホイール一回転あたりの砥粒切込み深さが小さくなったことに起因する。また、研削加工点の被削材中心からの距離が長くなると加工面は粗くなった。これは被削材の周速度が高まり、瞬間的な加工負荷が大きくなったことに起因する。
- 2) 高硬度ゴム砥石を用いた方が加工面の表面粗さの値は小さくなった。しかしながら、マイクロクラックは低硬度ゴム砥石を用いたほうが少なくなった。これは、低硬度ゴム砥石の方が弾性率は低いため、加工時の瞬間的な衝撃を吸収したものと考えられる。
- 3) 低硬度ゴム砥石を用いたBK7球面ガラスの研削加工においては、最大砥粒切込み深さ1.15 nm以下で被削材全面の延性モード研削が得られることが明らかになった。

参考文献

- 1) X.Sun, D.J.Stephenson, O.Ohnishi, A.Baldwin "An investigation into parallel and cross grinding of BK7 glass", Precision Engineering, Vol.30, 2006, pp.145-53