

酸化セリウムスラリー援用研削法における表面損傷の評価および分析

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 ○川里拓平, ◎柿沼康弘

要旨

高解像度カメラに必要な大口径光学ガラスレンズはガラスを直接加工して製造されており、高能率な研削加工で良い表面性状を得ることが求められている。本研究では、新しい研削手法である酸化セリウムスラリー援用研削法に着目し、その表面損傷について実験的に評価・分析することを目的とした。その結果、粗さに関してはスラリー援用の効果が見られるが、加工条件によって周期的に深い傷が発生することを明らかにした。

1. 緒論

現在、高画質映像を撮影するための高解像度カメラの需要が高まり、光学特性と物理特性に優れた光学ガラスを使用したレンズが求められている。光学ガラスは割れやすい硬脆材料のため、研削により形状を創成した後、表面品位を高めるため研磨加工を行う。しかし、研磨工程は時間がかかることに加え、形状を制御できないため、研削加工で高能率かつ表面品位の高い表面を得ることが望まれている^[1]。本研究では、高能率な延性モード研削が可能な酸化セリウムスラリー援用研削法^[2]に注目し、その加工面の評価および分析を行った。

2. 実験装置

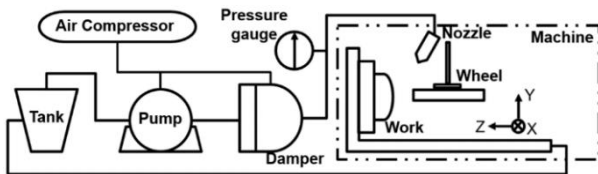


図1. スラリー供給装置の構成

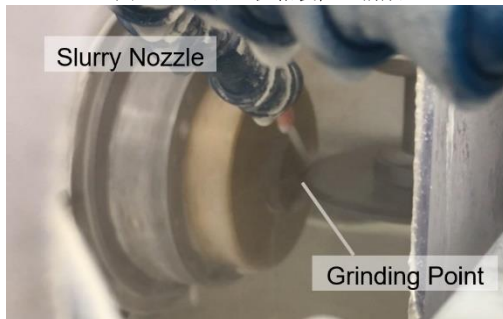


図2. 酸化セリウムスラリー援用研削中の様子

4軸超精密非球面研削盤に図1に示すスラリー供給装置を外付けして、酸化セリウムスラリー援用研削加工実験を行った。図2に研削の様子を示す。研削条件を表1に示す。主軸回転数 7350 min^{-1} 、切込み量 0.5 μm 、工作物回転数 30 min^{-1} 、砥石送り速度 3.0 mm/min とした。また、平均粒径 1 μm の酸化セリウム砥粒を純水に 5 wt%の割合で混合したスラリーを使用し、供給圧力は 0.4 MPaとした(表2)。

表1. 研削条件

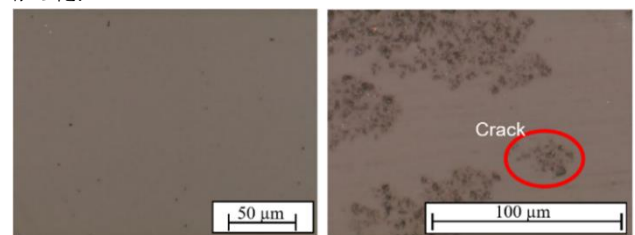
Spindle Rotation	7350 min^{-1}
Depth of Cut	0.5 μm
Workpiece Rotation	30 min^{-1}
Wheel Feed Rate	3.0 mm/min

表2. スラリー条件

Slurry Abrasive	La Doped CeO_2
Slurry Abrasive Size	Average 1 μm
Slurry Concentration	5 wt%
Slurry Pressure	0.4 MPa

3. 酸化セリウムスラリー援用研削法の効果

図3および図4に示すように、酸化セリウムスラリーを援用することで、加工面のマイクロクラックを抑制でき、全面にわたり Ra 10 nm 以下の表面を得られることを確認した。酸化セリウムスラリーの化学作用により通常みられる研削痕も消失することがわかった。



(a) 酸化セリウム援用あり (b) 酸化セリウム援用なし

図3. 酸化セリウムスラリー援用による加工面の変化

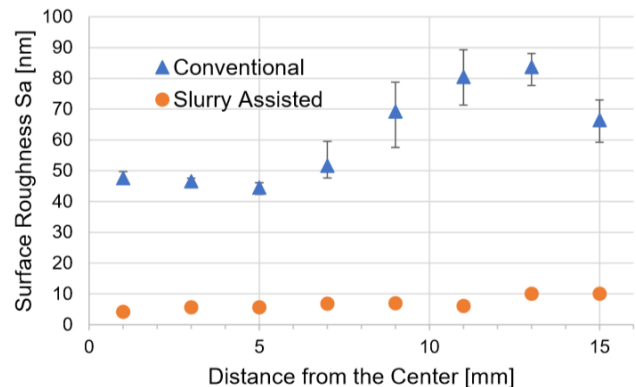


図4. 酸化セリウムスラリーが表面粗さに与える影響

4. 特異的な損傷の分析

酸化セリウムスラリーを援用した場合、表面品位は高まったが、加工条件によって図5に示すようなひっかけ傷が観測された。この傷は周期的で、白色干渉顕微鏡で計測を行ったところ平均 0.35 μm の深さであった。

傷の空間的周期の原因を考えるため、仕上げ加工の条件を変えて実験的に評価を行った。砥石が1周する際に工作物が回転方向に進む距離と一致することが明らかとなった。また、傷の長さについては粗加工で生じるうねり間隔が関係することを確認した。

噴射加工の場合には砥粒が工作物に滞留しやすいことが知られている^[3]ため、この傷の原因について酸化セリウム砥粒や離脱した砥粒の滞留であると考え、異物によって創生される傷の間隔について考察した。砥石の一点に異物が付着しているモデルを図6に示す。この時、異物が工作物上に描く軌跡は式(1)によって与えられる。

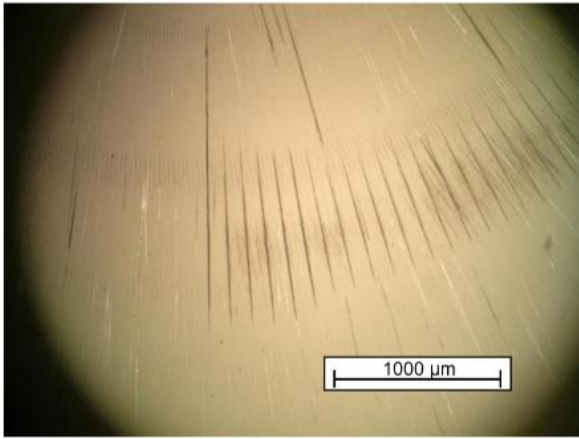


図 5. 酸化セリウムスラリー援用時に発生する傷

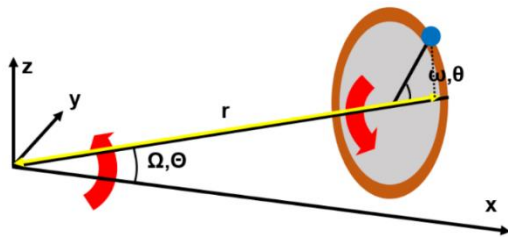


図 6. 砥石の 1 点に異物が付着したモデル

$$\begin{cases} x = \{(r_s - v_c t) + r_w \cos(\omega t + \theta_s)\} \cos \Omega t \\ y = \{(r_s - v_c t) + r_w \cos(\omega t + \theta_s)\} \sin \Omega t, \\ z = r_w \sin(\omega t + \theta_s) \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\omega} \left\{ \arccos \left(\frac{v_c \pi}{\Omega r_w} \right) + 2\pi l - \theta_s \right\} < t < \frac{1}{\omega} \left\{ \arccos \left(\frac{v_c \pi}{\Omega r_w} \right) + 2\pi l - (\pi + \theta_s) \right\}$$

ただし、 r_s は研削開始点の中心からの距離[mm]、 v_c は砥石送り速度[mm/s]、 r_w は砥石半径[mm]、 ω は砥石回転角加速度[rad/s]、 θ_s は異物の初期角度[rad]、 Ω は工作物回転角加速度[rad/s]、 l は整数、 t は時刻[s]である。

表 1 に示す実験条件において式(1)で与えられる軌跡を計算すると、軌跡は連続し、中心に向かうことがわかった(図 7)。

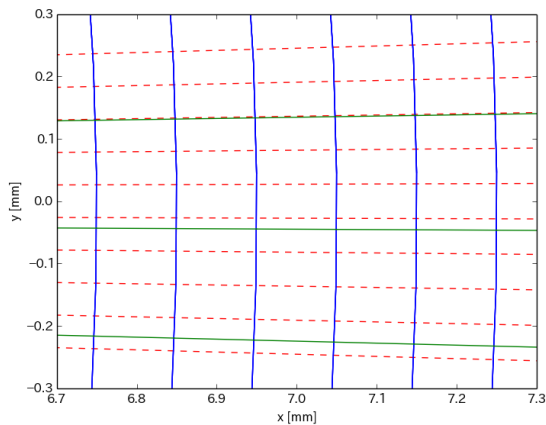


図 7. 異物の描く軌跡(緑)とうねりの山の位置(青), 中心に向かう線(赤)との関係

これは、工作物が回転しても異物が描く軌跡は連続することを意味し、異物によって生じる傷が仕上げ加工で生じる半径方向のうねり間隔を超えて連続する可能性が明らかになった。

このことから、脱落したダイヤモンド砥粒や酸化セリウム粒子といった異物が砥石に付着することでこの損傷を創生している可能性が高い。図 8 に、異物が存在する時の損傷の創生メカニズムについて示す。異物が砥石に付着することによりまず周期的な傷が発生し、その異物が図 9 のように工作物と砥石の相対運動によって脱落することで、内側に傷が伸びると考えられる。

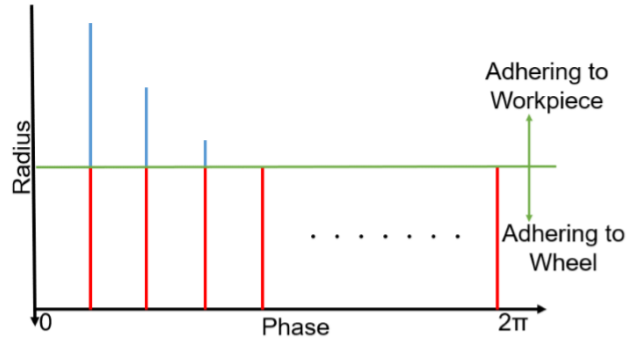


図 8. 損傷の想定創生メカニズム

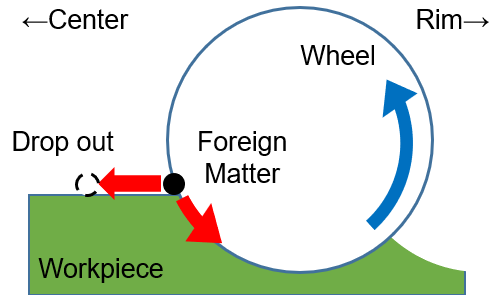


図 9. 異物の脱落メカニズム

実際に、観測された傷も図 5 のように最初の傷が長く内側に連続し、やがて一定の長さに収束する様子が見られた。

また、このモデルが正しければ研削時の高圧力によって異物が工作物に押し付けられ研削後も残置されると考えられる。傷を FE-SEM によって観測したところ図 10 のように炭素が観測されたことから、脱落した砥粒が一つの原因であることが裏付けられた。

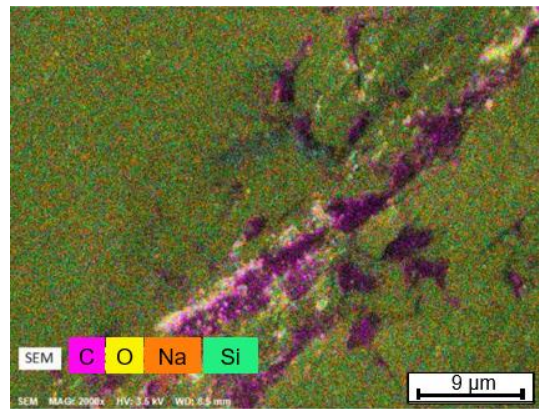


図 10. SEM による傷の観測結果

5. 結論

本研究により、酸化セリウムスラリーを研削加工に援用することで表面品位が高まることが明らかとなった。また、加工条件によって周期的な傷が発生することを示した。傷の創成機構や提案モデルから、その原因は脱落した砥粒が砥石に付着することで生じた可能性が高いことを示した。

参考文献

[1] 庄司克雄, 研削加工の軌跡, 精密工学会誌 Vol65.1 (1999) p33
 [2] Yasuhiro Kakinuma, Yoshiki Konuma, Masahiro Fukuta and Katsutoshi Tanaka, "Ultra-precision grinding of optical glass lenses with La-doped CeO2 slurry," CIRP Annals 68 (2019) pp335-348
 [3] 厨川常元, 噴射加工の最前線, 精密工学会誌 Vol68.2 (2002) p176