

PMMA の超精密切削による光学表面創成

慶應義塾大学理工学部機械工学科 ○清水榎利 ◎閻 紀旺

要 旨

ポリメタクリル酸メチル (PMMA) の超精密切削加工は、従来プレス成形を用いるレンズ生産において多品種少量生産や試作に適した代替加工法として期待される。しかし粘弾性体である PMMA の超精密切削特性に対する理解が不十分で、加工条件最適化の障害となっている。本研究では PMMA の超精密切削における被削性解明のために、切削条件が表面性状などに及ぼす影響を調査した。その結果、光学レンズに要求される 5 nmSa 以下の表面粗さを達成した。

1. 結論

近年、光学部品の材料として、軽量で透過率の高い樹脂材料の需要が高まっている。代表的な光学部品用樹脂として、ポリメタクリル酸メチル (PMMA) が挙げられる。PMMA は光の分散が小さく、光学ガラスと同等以上の透過率を持ち、様々な光学部品用樹脂の中でも特に高い光学性能を有している。現在、PMMA の光学レンズは主に精密金型を用いた成形加工により安価に大量生産されている。しかし、成形加工は高価な金型を必要とするため生産コストが高くなる。また、現在光学レンズ生産形態は多品種少量生産へと移行し、生産現場では効率的な生産システムの構築が求められている^[1]。成形加工は少量生産や試作には不向きであり、熱収縮による形状変化のため高精度の複雑形状加工は難しい。これらの課題の解決手法として、超精密切削が挙げられる。超精密切削では、高精度で複雑形状を加工することができる。また金型が不要なため、多品種少量生産を容易にし、特に製品試作段階での需要が拡大している。

樹脂材料は光学ガラスや金属とは大きく異なる物性を持つため、その被削性に関する研究が進められている。Xiao らは、切削速度上昇に伴うポリエチレンなどの樹脂の温度上昇と軟化により延性モード切削が可能となり、更なる切削速度の上昇と樹脂のひずみ速度の増加による脆性モードへの遷移が起こることを報告した^[2]。樹脂の種類により、被削性も大きく異なることが考えられるが、これまでに樹脂材料の物性に適した加工条件に関する研究は非常に少ない。また、マイクロ/ナノスケールの超精密切削の特性はほとんど未解明である。そのため経験則に頼った切削加工が行われており、加工面品質や加工効率の低さが課題である。PMMA についても、超精密切削における被削性の理解は進んでいない。

そこで本研究では、PMMA を被削材として超精密切削を行い、基本的な被削性の調査を試みた。基本的な加工特性の解明により高品質・高精度な光学樹脂レンズ加工実現への寄与が期待される。

2. 実験装置および方法

本研究では、超精密自由曲面加工機 NanoformX (アメテック (株) 製) を使用して平面切削実験を行った。被削材には直径 30 mm、厚さ 3 mm の PMMA 円板を用いた。切削条件を表 1 に示す。送り量変化実験では、被削性の良い無酸素銅を比較材として使用した。工具にはノーズ半径 1 mm、すくい角 0° の単結晶ダイヤモンド R バイトを用いた。切削加工後、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて加工面および切りくずを観察し、白色干渉計により加工面の表面粗さを測定した。図 1 に R バイトの切削加工モデルを示す。加工面の理論表面粗さ R_z および最大切り取り厚さ h_{max} はノーズ半径 R 、送り量 f 、切込み量 d よりそれぞれ次の式(1)および(2)で求められる。実験では、最大切り取り厚さを 140, 690, 1360 nm で変化させた。

表 1 切削加工条件

| 工具 | 単結晶ダイヤモンド R バイト |
|-------------------------|-----------------|
| 切り込み量 d [μm] | 10 |
| 送り量 f [μm/rev] | 1, 5, 10 |
| 切削速度 V [m/min] | 70, 250 |
| 最大切り取り厚さ h_{max} [nm] | 140, 690, 1360 |
| 加工雰囲気 | 乾式 |

$$R_z = \frac{f^2}{8R} \quad (1)$$

$$h_{max} = R - \sqrt{R^2 + f^2 - 2f\sqrt{2Rd - d^2}} \quad (2)$$

3. 結果および考察

3.1 送り量の影響

切削速度 $V=250$ m/min における送り量と表面粗さの関係を図 2 に示す。銅切削では理論値に従い送り量の減少により表面粗さが改善した。一方、PMMA については、送り量の減少とともに表面粗さは悪化した。PMMA において特異な傾向が現れた原因は、図 3 に示した $f=1$ μm/rev の場合の切削加工模式図によって説明できると考えられる。式(2)より、送り量が小さいと h_{max} も減少する。このとき切削面積が小さくなるため、切削中の消費エネルギー量が小さくなる。ここで、比エネルギー α を式(3)で定義する。

$$\alpha = \frac{E}{V'} \quad (3)$$

E は切削時に消費されるエネルギー、 V' は切削時に切取られる材料の体積である。切取り厚さが減少すると、エネルギー E と体積 V' はともに減少する。しかし、寸法効果 (Size effect) の影響によって、 α と V' の関係性は、体積の減少に伴い比エネルギーが増加すると考えられる。実際にマイクロ/ナノスケールの切取り厚さにおいて、切取り厚さが小さくなるにつれて比切削抵抗が増加することが報告されている^[3]。また、比切削抵抗は単位切削体積当たりの消費切削エネルギーとして考えることができる^[4]。切取り厚さが減少することで体積も減少するため、比エネルギー α と体積 V' の関係性は、比切削抵抗と切取り厚さの関係性と同一傾向を示し、送り量が小さくなると比エネルギーが増加すると考えられる。切削時のエネルギーは切削熱に変化されるため、比エネルギーが大

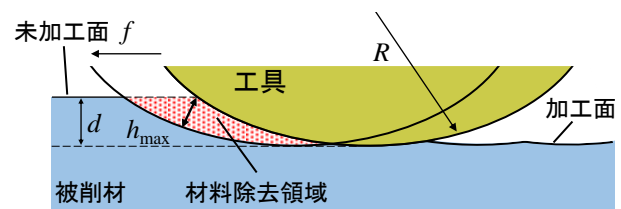


図 1 R バイトの切削加工モデル

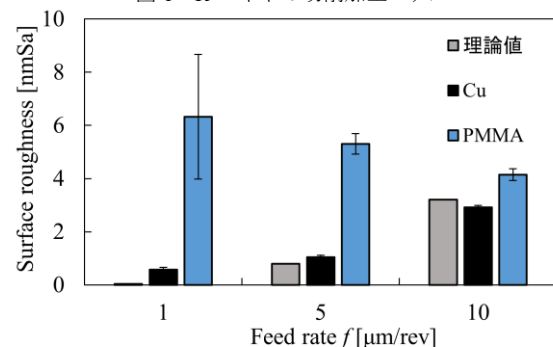


図 2 送り量と表面粗さの関係

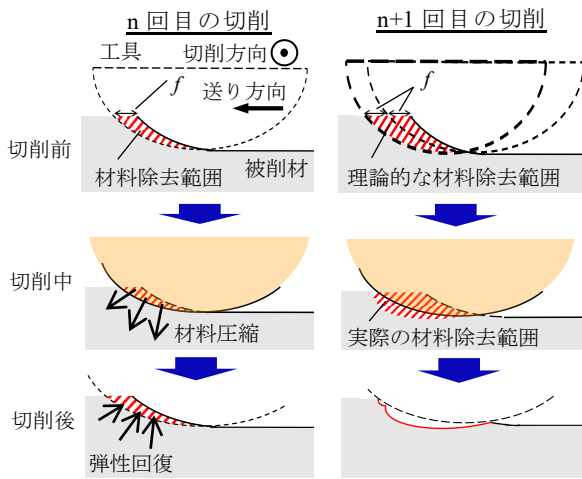
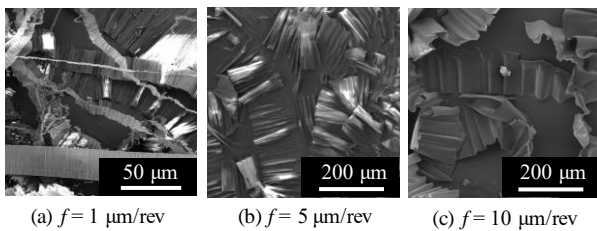
図3 $f=1 \mu\text{m/rev}$ の場合の切削加工模式図

図4 異なる送り量における切りくず形態変化

大きくなると切削熱が増加し、材料の温度が上昇する。ここで PMMA はガラス転移温度 $T_g = 105^\circ\text{C}$ の熱可塑性樹脂であることから温度が上昇するにつれて軟化することが報告されている^[5]。よって、送り量が小さくなると寸法効果の影響で材料温度が上昇して軟化すると考えられる。図3に示したように $f=1 \mu\text{m/rev}$ の場合、材料の軟化と刃先丸みの影響により切削が安定的に行われず、部分的に材料が内部へ圧縮され、切削後に弾性回復が生じ、切り残しが発生する。次の切削時に、切り残しを含めた2回分の切取り分に引っ張られるように、本来は削り取れない部分も一緒に除去される。そのため、むしれが形成され加工面の表面粗さが悪化したと考えられる。 $V=250 \text{ m/min}$ における異なる送り量での切りくずの SEM 画像を図4に示す。いずれの送り量においても流れ型の切りくずが得られたことから、延性モード切削が行われたことが分かる。ただし、図4(a)では不揃いな幅の切りくずが観察された。これは、 $f=1 \mu\text{m/rev}$ において安定した切削が行われていないことを示しており、図3で説明したような切り残しが発生するためであると考えられる。

3.2 切削速度の影響

異なる切削速度における加工面の表面粗さと送り量の関係を図5に示す。 $f=1 \mu\text{m/rev}$ では、切削速度を低くすると表面粗さが 5 nmSa 以下に改善した。ここで樹脂材料は粘弾性を有するため、切削速度の増加に伴いひずみ速度および切削熱が増加する傾向にあり^[2]、切削時に発生する切削熱により材料表面が軟化する。よって切削速度を減少させて切削熱の発生を抑制することで、表面粗さを改善できると推察される。しかし、 $f=10 \mu\text{m/rev}$ では切削速度を減少させることで表面粗さが悪化した。これは $f=1 \mu\text{m/rev}$ とは逆の傾向であった。その原因として、寸法効果と切削熱の両方の材料軟化による影響が関係していると考えられる。まず $f=1 \mu\text{m/rev}$ では、寸法効果によって材料が相対的に軟化しやすくなる。したがって $V=250 \text{ m/min}$ の場合、寸法効果と切削熱による軟化と弾性回復により表面粗さが悪化した。一方、 $f=10 \mu\text{m/rev}$ の場合は、寸法効果による被削材の軟化が相対的に抑制されると考えられる。よって $V=250 \text{ m/min}$ の場合と比べて $V=70 \text{ m/min}$ の場合は切削熱が相対的に減少し、被削材が十分に軟化されず硬いままであるため、局所的に脆性モード切削が行われたことで表面粗さが悪化した。このため、 $f=1 \mu\text{m/rev}$ と逆の傾向が見られたと考えられる。ここで $f=1, 10 \mu\text{m/rev}$ 時の加工面の SEM 画像を図6に示す。 $f=10$

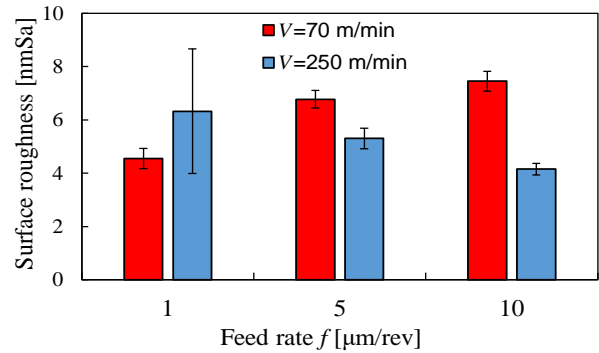
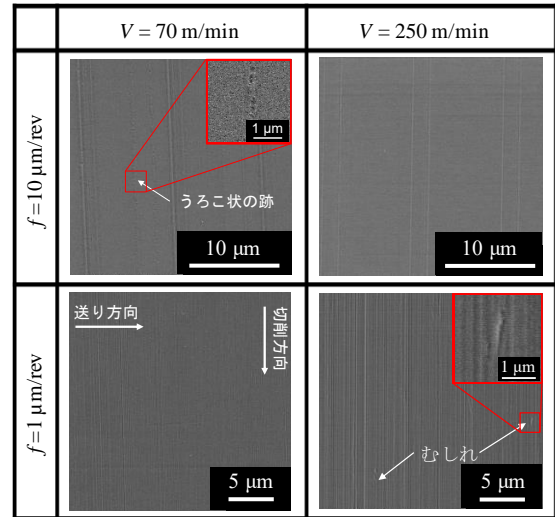


図5 異なる切削速度での送り量と表面粗さの関係

図6 $f=1, 10 \mu\text{m/rev}$ の加工面の SEM 画像

$\mu\text{m/rev}$ の時には、加工面にうろこ状の跡が確認された。これは、 $f=10 \mu\text{m/rev}$ の時に切削速度が減少することで局所的に脆性モード切削が行われたことを示していると考えられる。一方で、 $f=1 \mu\text{m/rev}$ の時には、加工面が平滑になった。これは、 $f=1 \mu\text{m/rev}$ の時に切削速度が減少することで弾性回復が抑制され、切削が安定的になったためだと考えられる。また、 $f=5 \mu\text{m/rev}$ では、切削速度の表面粗さに対する影響が小さく、 $f=1 \mu\text{m/rev}$ と $f=10 \mu\text{m/rev}$ の中間状態にあると考えられる。この送り量の値を境界に、送り量が大きいほど切削速度を増加させることで表面粗さを改善でき、送り量が小さいほど切削速度を減少させることで表面粗さを改善できると推察される。

4. 結論

送り量と切削速度を変化させて PMMA の超精密切削による光学表面創成について調査した。その結果、次の結論を得た。

- (1) 切削速度 $V=250 \text{ m/min}$ において、送り量の増加とともに表面粗さが改善し、理論とは逆の傾向を示した。
- (2) 送り量 $f=1 \mu\text{m/rev}$ において、切削速度の減少に伴い加工面の表面粗さが改善し、表面粗さ 5 nmSa 以下の加工面を得られた。一方、送り量 $f=10 \mu\text{m/rev}$ において、切削速度の減少に伴い加工面の表面粗さが悪化した。
- (3) いずれの送り量においても流れ型の切りくずを得られたが、送り量 $f=1 \mu\text{m/rev}$ の場合に幅が不揃いの切りくずが確認され、切削が不安定になったことがわかった。

参考文献

- [1] Y. INOUE et al., Bull. JSME, 83, (2017), pp. 1-10.
- [2] K. Q. Xiao et al., Int. J. Mech. Sci, 44, (2002), pp. 2317-2336.
- [3] A. Simoneau, et al., Int. J. Mach. Tools Manuf, 46, (2006), pp. 467-481.
- [4] 日本機械学会, 機械工学事典, 丸善出版, 1997.
- [5] J. Richeton et al., Int J Solids Struct, 43, (2006), pp. 2318-2335.