

# 光学レンズ用 PMMA の超精密切削に関する研究

慶應義塾大学理工学部機械工学科 ○荒木信乃 ◎関 紀旺

## 要 旨

光学プラスチックをはじめとする高分子材料の超精密切削加工は、プレス成形が困難な大型・複雑形状の加工や多品種少量生産への応用が期待されている。しかし、粘弾性体である高分子材料の超精密切削特性は未だ十分に解明されていない。本研究では、単結晶ダイヤモンド工具を用いて光学レンズ用ポリメチルメタクリレート樹脂(PMMA)を切削し、切削速度や加工雰囲気などが切りくず生成および表面形態へ及ぼす影響について検討を行った。また、基礎実験の成果を踏まえて大口径フレネルレンズの加工を試みた。

## 1. 結論

光学プラスチックは、レンズ等の精密部品の基板材料として近年需要が高まっている。これらの光学プラスチックの多くは、精密金型を用いた射出成形で安価に大量生産されている。しかし射出成形は高価な金型を必要とするため、多品種少量生産には不向きである。また大型で形状が複雑である場合、金型からの離型が困難となる上、冷却時の収縮によって形状が変化してしまう問題もある。これに対し、超精密切削加工では、高い形状精度で複雑形状を直接加工することが可能である。また金型を必要としないことで多品種少量生産を容易にし、特に新製品の試作段階において重要な役割を果たしている。

光学プラスチックをはじめとする高分子材料の切削では、温度とひずみ速度に対する材料特性の変化が被削性に影響することが知られている。例えば、Carrらは、ガラス転移温度が室温より高い熱可塑性樹脂は、室温では脆性的に切削が行われるが、切削速度の増加に伴う温度上昇によって材料が軟化し、延性的に切削されることを示した<sup>1)</sup>。またXiaoらは、切削速度が増加して材料が応答できない変形速度に達すると、ひずみ速度による材料の硬化の影響が支配的になり、脆性的に切削されることを示した<sup>2)</sup>。しかし、これらは一部の高分子材料のみに対する傾向を示したものであり、高分子材料の材質によって切削メカニズムが大きく異なると考えられる。また、先行研究はいずれも加工寸法がサブミリオード以上となる切削であり、マイクロナノオーダーの超精密切削における光学プラスチックの被削性を調査した研究はほとんどないのが現状である。

そこで本研究では、光学プラスチックとして代表的なポリメチルメタクリレート樹脂 (PMMA) の超精密切削を行い、切削速度や送り量、加工雰囲気などが表面形態および切りくず生成へ及ぼす影響について検討した。またその成果を利用し、大口径PMMA フレネルレンズの切削加工を試みた。

## 2. 実験方法

本研究では、まず超精密加工機((株)不二越製 ASP-15)を使用しPMMAの平面切削基礎実験を行った。実験条件を表1に示す。工具には単結晶ダイヤモンド平バイトを用いた。平バイトの切削モデルを図1に示す。平バイトによる切削において、送り量 $f$ 、切込み角 $\kappa$ を用いて切取り厚さ $h$ は(1)式のように表される。

$$h = f \sin \kappa \quad (1)$$

平面切削基礎実験の条件を表1に示す。まず、切込み角を大きくし、加工雰囲気をエアに設定し、切削速度と送り量を段階的に変化させ加工面の変化を観察した。次に、大きな切削幅を得るために切込み角を小さく設定し、赤外線サーモグラフィによって切削温度を測定した。また、切削雰囲気を使用せず、切りくずを採取し、走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察を行った。

基礎実験の後、超精密自由曲面加工機 (AMETEK Precitech (株)製 Nanoform X) によってフレネルレンズの加工を行った。実験条件を表2に示す。Nanoform X はリニアモータ駆動による完全非接触式の軸駆動が可能であり、三次元複雑形状の加工に適している。フレネルレンズの回折形状を精密に切削するため、工具には単結晶ダイヤモンドVバイトを使用した。

表1 平面切削基礎実験の実験条件

工具	単結晶ダイヤモンド平バイト
切込み角 $\kappa$ [°]	40, 2
送り量 $f$ [μm/rev]	0.5~30
主軸回転数 $C$ [rpm]	2000
切込み量 $a$ [μm]	10
切削速度 $V$ [m/min]	38~855
雰囲気	湿式/乾式

表2 フレネルレンズ加工の実験条件

	粗加工	仕上げ加工
工具	単結晶ダイヤモンドVバイト	
切込み角 $\gamma$ [°]	30	7
送り量 $f$ [μm/rev]	10	0.3
主軸回転数 $C$ [rpm]	2000	500
切込み量 $a$ [μm]	500	10
切削速度 $V$ [m/min]	0~1068	0~267
雰囲気	乾式	乾式

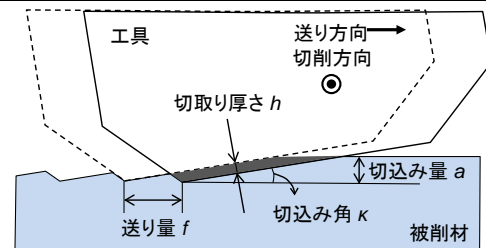


図1 平バイトの切削モデル

## 3. 平面切削基礎実験の結果および考察

### 3.1 加工面の観察

切込み角を  $40^\circ$ 、送り量を  $5\sim 6 \mu\text{m}/\text{rev}$  (切取り厚さ  $3.22\sim 3.86 \mu\text{m}$ ) とし、異なる切削速度で得られた加工面の SEM 画像を図2に示す。いずれの場合もクラックのない平滑な表面が得られた。したがって、PMMA はマイクロオーダーの切り取り厚さでは基本的に延性的に切削されるといえる。しかし切削速度が  $38\sim 107 \text{ m}/\text{min}$  のとき、工具軌跡に沿って不規則に鱗状の跡が見られた。この跡は切削速度が増加するにつれて少なくなり、 $785\sim 855 \text{ m}/\text{min}$  の場合は見られなかった。切削速度が増加すると、単位時間当たりの材料除去量が大きくなるため、塑性変形によって発生する熱量が増加し、切削温度が上昇することが考えられる。PMMA はガラス転移温度が  $105^\circ\text{C}$  程度の熱可塑性樹脂であるため、室温では脆性的な破壊挙動を示すが、温度上昇によって軟化する。このようなことから、切削速度が  $38\sim 107 \text{ m}/\text{min}$  のとき切

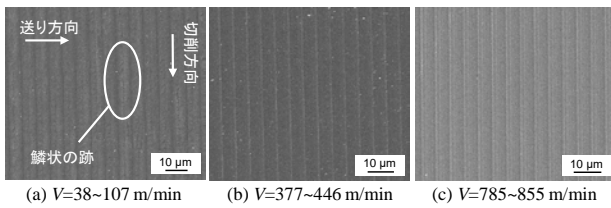


図 2 異なる切削速度に対する加工面の変化

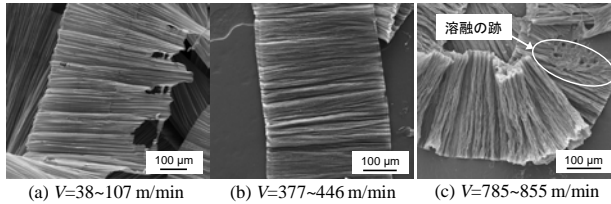


図 3 異なる切削速度に対する切りくず形態の変化

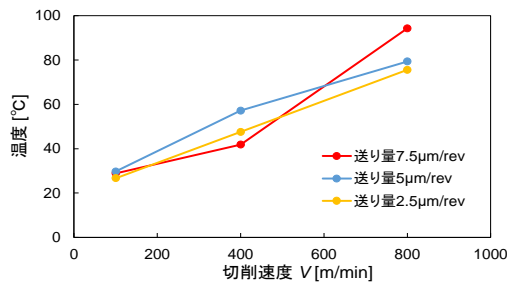


図 4 切削速度と送り量による切削温度の変化

削温度が低く、材料が脆性的で部分的にせん断変形が不安定になったと考えられる。そして切削速度を増加させると温度が上昇して材料が軟化し、より延性的に切削されたと考えられる。

### 3.2 切りくず形態の観察

次に、異なる切削速度に対する切りくず形態の変化を図 3 に示す。いずれの場合も流れ型に近い連続的なりボン状の切りくずが得られた。しかし、切削速度が 38~107 m/min のとき切りくずの端が不規則に裂けた波状になっており、数十 μm の穴が点在していた。切削速度が 377~446 m/min または 785~855 m/min の場合は幅が均一な切りくずが得られ、さらに 785~855 m/min の場合は部分的に熔融跡が確認された。ここから、切削速度が低いとき、切りくず生成時のせん断変形が部分的に不安定で、切削速度が上昇するにつれて安定することがわかる。この結果は、図 2 の加工面の変化の様子と一致した。

### 3.3 切削温度の計測

異なる切削速度に対して、切削温度を赤外線サーモグラフィによって計測した結果を図 4 に示す。いずれの送り量に対しても切削速度の上昇に伴って切削温度が上昇した。切削速度が 38~107 m/min のときはいずれも温度が 30°C 程度と室温に近い値となった。それに対して切削速度が 785~855 m/min のとき、切削温度は 70~100°C 程度となった。また、実際の加工点の切削温度は計測結果よりも高い可能性がある。図 2 (c) において、PMMA のガラス転移温度の 105°C まで温度が上昇した結果、切りくずが部分的に熔融したと考えられる。図 2 の加工面および図 3 の切りくず形態の変化は、切削速度の変化に伴う切削温度の影響が支配的であるとされる。

## 4. フレネルレンズ加工の結果と考察

### 4.1 工具摩耗形態の観察

フレネルレンズの切削実験後に観察された工具切れ刃の SEM 画像を図 5 に示す。高分子材料の切削加工では、工具と試料間の摩擦によって摩擦接触点近傍に高電界が発生し、単結晶ダイヤモンド工具に化学反応摩耗と放電摩耗が起こることが知られている<sup>3)</sup>。図 5 の摩耗は工具と試料が加工中に接触しなかった部分で確認された。図 5 (a) の工具エッジ部分は、高電界により発生したトライボマイクロプラズマが原因でダイヤモンドが化学反応を起こし、摩耗した跡であるとされる。また、図 5 (a) (b) に見られる、枝分かれした樹状の模様はリヒテンベルク図

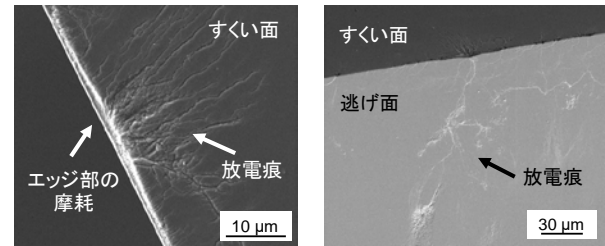


図 5 工具摩耗の様子

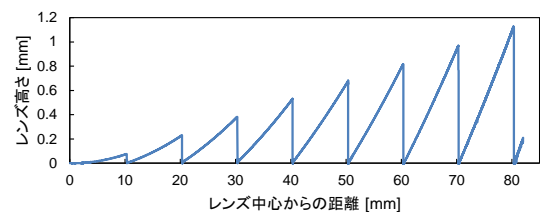


図 6 フレネルレンズの断面プロファイル

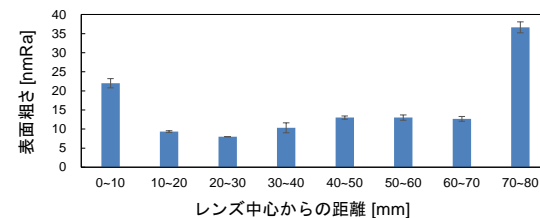


図 7 フレネルレンズの表面粗さ

形 (Lichtenberg figure) と呼ばれ、放電の跡であると考えられる。これらはいずれも高電界の発生によって引き起こされる。したがって、摩耗を低減させるためには加工雰囲気や導電性ダイヤモンドバイトの使用などが望ましいと考えられる。

### 4.2 フレネルレンズ形状

試作したフレネルレンズの断面プロファイルを図 6 に示す。回折形状のエッジが精密に形成されたことがわかる。また、表面粗さの変化を図 7 に示す。外周部では切削速度や切削雰囲気の影響で表面粗さは大きくなったが、表面の広い範囲で 10 nmRa 程度となり、透明性が高かった。したがって、適切な実験条件を設定することにより、表面粗さ 10 nmRa 以下を達成可能であることを確認した。切りくず排出性の向上や工具摩耗の抑制により表面粗さをさらに改善することができると考えられる。

## 5. 結論

光学レンズ用 PMMA の超精密切削を行い、平面切削基礎実験およびフレネルレンズの加工を通して以下の結論を得た。

- (1) 送り量および切り取り厚さがマイクロオーダーの切削において、PMMA は広い範囲で延性的に切削された。
- (2) 切削速度増加に伴い切削温度が室温から 100°C 程度まで上昇し、材料が軟化することで加工性が変化した。
- (3) PMMA の切削において、単結晶ダイヤモンド工具に摩擦化学反応摩耗と摩擦放電摩耗の 2 形態の摩耗が生じた。
- (4) V バイトによる大口径フレネルレンズの加工において、表面粗さ 10 nmRa 以下を達成可能であることを確認した。

## 参考文献

- 1) J. Carr and C. Feger : Ultraprecision machining of polymers, Precision Engineering, **15**, 4 (1993) 221-237.
- 2) K.Q. Xiao and L.C. Zhang : The role of viscous deformation in the machining of polymers, International Journal of Mechanical Sciences, **44** (2002) 2317-2336.
- 3) G.P.H. Gubbels, G.J.F.T. van der Beek, A.L. Hoop, F.L.M. Delbressine and H. van Halwijk : Diamond Tool wear when cutting amorphous polymers, Annals of the CIRP, **53**, 1 (2004) 447-450.