プラスチックレンズの高精度切削に関する実験検討*

—形状誤差発生要因の分析と高精度チャッキング法—

小泉幸久** 前田幸男** 王英夫** 梶田正美*** 岩谷重春†

Experimental Investigation of Precision Plastic Lens Cutting
- Development of Precision Chucking Technique by the Profile Error Analysis -

Yukihisa KOIZUMI, Yukio MAEDA, Ying-Fu WANG, Masami MASUDA and Shigeharu IWAYA

For aspheric plastic lenses, very smooth surface roughness and high profile accuracy are required. However when a plastic lens is machined from plastics by cutting directly, there is a serious problem in that profile accuracy deteriorates by chucking even if the lens is machined precisely on a machine tool. Consequently, a new chucking technique which decreases the deformation has been developed by analyzing the cause. It has been also clarified that the chucking deformation before machining is different from that after machining. By using this technique, an aspheric plastic lens can be machined with high profile accuracy of less than $1\ \mu\text{m}$.

Key words: diamond turning, diamond tool, plastic lens, profile accuracy, surface roughness, chucking deformation

1. 緒 言

プロジェクション TV, ビデオカメラなどの光学応用製品の高性能化や小型軽量化を目的として, これらの製品の光学系には非球面プラスチックレンズが使用されている。この非球面プラスチックレンズの加工精度は, 光学性能に大きな影響を与える。一般にプラスチックレンズは, 射出成形により量産されているが, 多品種少量生産や製品試作段階では, 製作期間を短縮するために, プラスチック素材から直接切削加工することが検討されている。

しかし, プラスチック材は成形用金型に使用される金属材料に比べ, 縦弾性係数が小さく変形しやすいこと¹⁾, 工具切れ刃形状の転写精度が悪い²⁾など, 精密加工が難しい材料である。このためダイヤモンド工具によりプラスチック材を加工した時, 形状精度が悪く, 成形レンズと同等な高精度レンズを安定して製作できないという問題があった。

そこで本研究では, プラスチック光学部品に多用されている PMMA 樹脂(Poly Methyl Methacrylate)を対象とし, これをダイヤモンド工具により切削加工した時の形状誤差発生要因の分析と, プラスチックレンズの高精度チャッキング法について実験的に検討した。

2. 実験方法

実験に用いた非球面加工機³⁾を図1に, 加工機の仕様を表1に示す。この非球面加工機は, 油静圧案内の X, Z テーブルと X テーブル上に設置された油静圧軸受の回転テーブル, Z テーブル上に設置された空気静圧軸受の主軸から構成されている。これらの X, Z, 回転テーブルにより工具軌跡を同時3軸制御できる。X, Z テーブルの最小移動量は $0.01\ \mu\text{m}$, 直線

運動精度は $0.03\ \mu\text{m}/100\text{mm}$ 以下, 同時3軸制御による軌跡精度は $0.3\ \mu\text{m}$ 以下である。

PMMA 樹脂の機械的性質を表2に示す。成形金型に使用される焼入れ鋼に比べ, 縦弾性係数が $1/100$ 程度と非常に小さく, 変形しやすいことがわかる。このことから, プラスチック材の内部ひずみによる変形も無視できないと考えられるので, 本研究では内部ひずみの少ない注型材を用いた。

Fig.1 Ultraprecision lathe

Table 1 Specification

Workpiece dimension	$\phi 400\text{mm}$
Spindle speed	$0-25\ \text{s}^{-1}$
Resolution (X,Ztable)	$0.01\ \mu\text{m}$
(Rotary table)	0.0001°
Contouring accuracy	$0.3\ \mu\text{m}$

Table 2 Mechanical properties

Tensile strength	$7.45 \times 10^7\ \text{Pa}$
Modulus of direct elasticity E	$2.94 \times 10^9\ \text{Pa}$
Coefficient of linear expansion	$7 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$
Specific heat	$1.47 \times 10^{-3}\ \text{J/kg}\cdot\text{K}$
Poisson's ratio ν	0.35

*原稿受付 平成11年6月7日

**正会員 (株)日立製作所生産技術研究所(横浜市戸塚区吉田町292)

***正会員 新潟大学自然科学研究科(新潟市五十嵐2の町8050)

†(株)日立製作所映像情報メディア事業部(横浜市戸塚区吉田町292)

Fig.2 Chucking method for experiment

Fig.3 A dominant cause of profile accuracy

Table 3 Cutting conditions	
Tool	A single crystal diamond tool with 3mm radius. Rake angle: 0°
Workpiece	Polymethyl methacrylate
Spindle speed	16.7 s ⁻¹
Feed rate	10 μm/rev
Depth of cut	10 μm
Vacuum force	6.0 × 10 ⁻³ Pa

精密切削のチャッキング方法^{4) 5)}として、ボルト締結法、真空吸引法、PVA(Polyvinyl Alcohol)水溶液による接着法が採用されている。このうち、接着によるチャッキング法では、接着剤の硬化時間が長いこと、接着層の支持剛性が低いなどの理由から、ここでは図2に示すボルト締結法(固定ボルト6本、設定締付けトルク $8 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$)と真空吸引法について検討した。いずれもチャック外径100mm、チャックパッド面の幅10mmである。これらのチャックを加工機の主軸に取り付け、チャックパッド面を機上でセルフカットした後、実験に使用した。PMMA樹脂の切削条件は、特に断らないかぎり表3に示すとおりである。

なお、切削実験に際し、プラスチック素材を表3の切削条件で外周から内周に向かって数回加工することで、前加工形状に起因する切込み変動を低減した。

2.1 非球面プラスチックレンズの切削実験

非球面加工機を同時3軸制御し、非球面プラスチックレンズを切削した。非球面プラスチックレンズの形状精度は触針式センサを用いて、機上では機上計測装置⁶⁾(測定分解能 0.01 μm, 測定精度 0.4 μm/100mm)、機外では三次元測定機(測定分解能 0.01 μm, 測定精度 0.3 μm/100mm)で測定した。

2.2 プラスチック円板の平面切削実験

非球面レンズにおいて、加工時の工具と工作物の相対的位置誤差⁶⁾、測定時の触針式センサのアライメント誤差、および加工による形状誤差を分離することが難しい。そこで加工に起因する形状誤差を他の要因と分離するために、プラスチック円板(外径 φ100mm, 内径 φ5mm, 厚さ 5mm)を平面切削した。このプラスチック円板には、工具の芯合わせを簡便にするため中心部に直径 5mmの穴を設けた。この穴を設けたことによる剛性の低下率は、1.6%である。

表面粗さは、触針式表面粗さ計(Talysurf)で測定した。また切削力は、工具ホルダの下面に設置した圧電型3分力動力

Fig.4 Typical examples of chucking deformation and machining deformation

計(Kistler社製)を用いて測定した。プラスチック円板の形状精度は、機上では差動トランス型変位計、機外では触針式表面粗さ計を用いて、30°ごとに中心を通る6方向に測定した。機外の触針式表面粗さ計のテーブル運動精度は0.1 μm/100mmである。

3. 実験結果と考察

3.1 形状精度の劣化要因

初めに、非球面プラスチックレンズをアール工具により切削加工した時の形状精度を図3に示す。ここではボルト締結法によりレンズ素材をチャックし、非球面形状と工具ノーズ半径との干渉を避けるため、ノーズ半径 3mmのアール工具(単結晶ダイヤモンド)を用いて、凸面、凹面の順に加工した。ここでは、最初に加工した面をSide A、次に裏返して加工した面をSide Bと呼ぶ。図3から、加工直後に機上で測定した形状精度は2.4 μmであるが、チャックから取り外すと8 μmと劣化している。この形状精度の劣化要因として、以下のことが考えられる。

- ① プラスチックレンズをチャックにボルト締結すると弾性変形し、この変形が加工後にチャックから取り外すと弾性回復し形状誤差となる。
- ② 凹面と凸面を持つ非球面形状を加工するとき、工作物とアール工具の切れ刃の接触弧長が変化し、ノーズ半径の等価曲率が変わる(凹面の等価曲率半径: 最大 R3.3mm, 凸

Fig.5 Relationship between nose radius and machining deformation

Fig.6 Relationship between nose radius and cutting force

面の等価曲率半径：最小 R2.8mm）。このため凹面と凸面の切削後の残留応力にアンバランスが生じ、チャック解放後に形状誤差となる。

そこでここでは、①、②の誤差要因を図4に示すように、プラスチック円板を平面切削し、チャックに起因する変形と加工に起因する変形に分離した。図4(a)はチャック取付け前、後のプラスチック円板の形状変化を示し、図4(b)はプラスチック円板の切削前後において、加工しない裏面の形状変化を示したものである。ここでは、図4(a)の形状変化をチャッキング変形と呼び、図4(b)の形状変化を加工変形と呼ぶ。

このように誤差要因を、チャッキング変形と加工変形に分離し、これらがプラスチックレンズの形状精度に及ぼす影響について実験的に検討した。

3.2 工具ノーズ半径が加工精度に及ぼす影響

図5に、工具ノーズ半径が加工変形に与える影響を示す。実験には、ノーズ半径 0.03, 0.3, 3, 30, 300mmの5本のダイヤモンド工具を用い、工具送り量 10μm/revと一定で平面切削した。図5から、ノーズ半径に対し加工変形は、顕著な傾向が認められない。

Fig.7 Difference of chucking method between bolts and vacuum

しかし、アルミニウム合金のダイヤモンド切削において、工具ノーズ半径は加工面の残留応力と相関があることが知られている⁷⁾。PMMA樹脂のダイヤモンド切削において、ノーズ半径と加工変形に相関が認められない原因として、実験データのばらつきが考えられる。プラスチック材は、金属材料のようにウェットエッチングやX線応力測定、電子線回折などによる加工面の残留応力や加工変質層の直接観察が極めて難しい。

そこでここでは、切削力のうち、背分力が加工面の加工変質層と相関があると報告されている⁷⁾ので、加工変形を切削力により間接的に評価した。

図5と同一の実験における切削力を測定した結果を図6に示す。この図から、ノーズ半径の増加にともない、主分力は大きくなる傾向が認められるが、背分力は0.02Nとほぼ一定である。

以上のことから、図3の非球面切削において、凹面と凸面で工具ノーズ半径の相対曲率半径が2.8mmと3.3mmで変化しても加工変形には、ほとんど差が生じないと推察される。

次に図4(a)のチャッキング変形が加工後の形状精度に与える影響について実験的に解析した。

3.3 チャッキング変形が加工精度に及ぼす影響

工作物を弾性変形させることなくチャックに固定できれば、切削後の工作物の弾性回復量が小さくなり、形状精度を向上できると考え、図4(a)のチャッキング変形の低減を検討した。

初めに、図2のボルト締結法と真空吸引法の2種のチャック法を比較した結果を図7に示す。チャック法の比較に際し、3枚のプラスチック円板を用いて、それぞれのチャッキング変形と加工変形を測定した。図7から、以下のことが言える。

- ① 加工変形は、ボルト締結法、真空吸引法ともに 0.1～2.4μmであり、両者に差が認められない。
- ② チャッキング変形は、ボルト締結法で 0.4～12μmに対し、真空吸引法では 0.1～7.8μmと小さい。

ボルト締結法におけるチャッキング変形が大きい原因として、プラスチック円板の外周部に配置された6本のボルトの締付け力の不均一やプラスチック円板の雌ねじ部周辺の局部的な変形によるものと考えられる。これらの結果から、ここでは真空吸引法におけるチャッキング変形の低減を検討した。

チャッキング変形の検討に先立ち、真空圧とチャッキング変

Fig.8 Effect of vacuum force on chucking deformation

Fig.9 Deformation of chucking by vacuum

形の相関を検討した。真空吸引法において、真空圧を $-4 \times 10^4 \sim -7.2 \times 10^4 \text{ Pa}$ の範囲で変えたときのチャッキング変形を図8に示す。測定に際し、チャッキング変形が異なる2枚のプラスチック円板を用いた。図8から、いずれのプラスチック円板においても、チャッキング変形は真空圧に対しても顕著な差が認められない。そこで本実験では、真空圧 $-6 \times 10^4 \text{ Pa}$ を採用した。

次に、図2(b)の真空吸引法におけるチャッキング変形の発生モードを分析した。プラスチック円板の前加工面は、図4(a)に示すように理想的な平面ではなく、チャックパッド面に接する面は、通常 $1 \mu\text{m}/10\text{mm}$ 以下の凹面または凸面である。このため、プラスチック円板をチャックパッド面に吸着した時、チャッキング変形が発生すると考えられる。そこで、チャックパッド面に接する領域のプラスチック円板の形状をテーパ形状に近似し、このテーパ量を $-13 \sim 13 \mu\text{m}/10\text{mm}$ と変化させたときのチャッキング変形との相関を検討した。その測定結果を図9に示す。この図において、プラスチック円板とチャックパッド面の間隙が外端部にできるときを正、内端部にできるときを負とした。またチャッキング時にプラスチック円板が、凸面方向に変形するときを正、凹面方向に変形するときを負とした。図中に、理論変形を破線で示す。中心に穴を持つ円板が外周部で曲げモーメント M を受ける時、たわみ角 dw/dr とたわみ w の理論値はそれぞれ式(1)、(2)で表される。

Fig.10 Effect of pad shape on chucking deformation and spring back

$$\frac{dw}{dr} = -\frac{C_1 \times r}{2} - \frac{C_2}{r} \tag{1}$$

$$w = -\frac{C_1 \times r^2}{4} - C_2 \times \log\left(\frac{r}{a}\right) + C_3 \tag{2}$$

ここで

$$C_1 = \frac{2a^2 M}{(1 + \nu) D(a^2 - b^2)}, \quad C_2 = \frac{a^2 b^2 M}{(1 + \nu) D(a^2 - b^2)}$$
$$C_3 = \frac{a^4 M}{2(1 + \nu) D(a^2 - b^2)}, \quad D = \frac{E h^3}{12(1 + \nu^3)}$$

ただし、 a ：円板半径
 b ：中心穴半径
 h ：円板板厚
 E ：弾性係数
 ν ：ポアソン比

これらの式を用いてプラスチック円板とチャックパッド面が密着することを境界条件とし、表2の数値を用いてチャッキング変形の理論値を計算した。なお、最小二乗法により求めた実験値の近似直線を図9に併記した。この図より以下のことが分かる。

- ① テーパ量の増加に伴ってチャッキング変形は大きくなる。
このことから、プラスチック円板とチャックパッド面の内端部に間隙がある状態でのチャッキング変形は凹面方向に変形し、外端部に間隙がある状態では凸面方向に変形する。
- ② 実験値の近似直線は、理論値の直線の傾きとほぼ同じであるが、原点を通らずに、チャックパッド面の外端部に間隙が生じる方向に平行移動している。

以上のことから、真空吸引法におけるチャッキング変形の発生モードとして、プラスチック円板はチャックパッド面に倣うように変形するが、この変形が最小となる状態ではチャックパッド面の外端部に間隙が生じると言える。この外端部の間隙は、図8から真空圧に依存しないと言える。

次にプラスチック円板を真空吸引した時の弾性変形量であるチャッキング変形と切削した後の弾性回復量との相関を実験的に検討した。その結果を図10に示す。ここでは、切削直後に

Fig.11 Effect of newly developed chucking

机上計測した形状とチャック解放後に機外測定した形状との変化量を弾性回復量とした。この実験に際し、真空吸引法のチャックパッド面を、

Type A：平面形状（外端部の間隙： $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ ），

Type B：外端部に約 $3 \mu\text{m}$ の間隙ができるテーパ形状，

Type C：プラスチック円板と約 $0.2 \mu\text{m}$ で同じ傾きのテーパ形状，に机上修正した3種類のチャック方式を用い、それぞれ4枚のプラスチック円板のチャッキング変形と弾性回復量を絶対値で比較検討した。

図10から、以下のことがわかる。

- ① 各チャック方式におけるチャッキング変形と弾性回復量に相関が認められない。
- ② チャッキング時の外端部の間隙が約 $3 \mu\text{m}$ (Type B)、 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ (Type A)、約 $0.2 \mu\text{m}$ (Type C)と小さくなると、切削後の弾性回復量は $10.5 \mu\text{m}$ 以下、 $5.2 \mu\text{m}$ 以下、 $2.4 \mu\text{m}$ 以下と低減する。

以上のことから、真空吸引法における工作物のチャッキング変形を小さくしても、加工後の形状精度に影響する弾性回復量を低減できないと言える。チャッキング変形と弾性回復量が同じにならない原因は、真空吸引した時に工作物とチャックパッド面に間隙が生じ、このチャッキング状態で工作物を外周部から加工する時に、工作物がチャックパッド面に密着し、その後の内周部の加工においても密着状態が保持されるためと考えられる。

3.4 非球面プラスチックレンズの加工精度

工作物に対するチャックパッド面のテーパ量を $0.2 \mu\text{m}/10\text{mm}$ 以下の精度で同じ形状に机上修正する真空吸引法を用いて、図3と同じ形状の非球面プラスチックレンズを表3の加工条件で切削した。4枚のレンズを加工した時の形状精度を図11に、レンズの外観と表面粗さの測定例を図12に示す。なお、図11にチャックパッド面を平面に机上修正したボルト締結法を用いて、真空吸引法と同様に加工したレンズの形状精度を併記した。これらの図から、形状精度はボルト締結法で最大 $12.3 \mu\text{m}$ であるのに対し、本開発の真空吸引法を用いることにより $3 \mu\text{m}$ 以下に向上できる。特にチャックパッド面に接するレンズの断面形状が直線に近い場合の形状精度は、Side A、Bとも $1 \mu\text{m}$ 以下と良好であり、この時の表面粗さは $0.03 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ が得られた。

Fig.12 Surface roughness of aspherical lens

4. 結 論

非球面プラスチックレンズの切削加工における形状精度の向上を目的とし、形状誤差発生要因の分析と高精度チャッキング法の検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 形状精度劣化要因を、チャッキング時の弾性変形によるチャッキング変形と、加工面の残留応力のアンバランスによる加工変形に分離・比較し、チャッキング変形が大きいことが分かった。
- (2) 真空吸引法において、チャッキング時の弾性変形量と切削後の弾性回復量には差があり、弾性回復量が加工後の形状精度に直接影響する。
- (3) 工作物に対し、チャックパッド面を $0.2 \mu\text{m}/10\text{mm}$ 以下の精度で同じテーパ形状に机上修正する真空吸引法により、弾性回復量を低減でき、形状精度を $1 \mu\text{m}$ 以下に向上できる。

参 考 文 献

- 1) 新野秀憲, 三井公之: 超精密金属鏡加工技術の研究, 日本機械学会論文集(C), 48, 471 (1995) 3125.
- 2) 平川健治, 小林 昭, 河西敏夫: ダイアモンド工具によるプラスチックの鏡面加工, 昭和59年度精機学会春季大会学術講演会論文集 (1984) 43.
- 3) 前田幸男, 永山和彦, 小泉幸久, 梶田正美, 西脇信彦: 超精密非球面加工機の研究, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1990) 101.
- 4) 小林 昭ほか: コンタクトレンズの超精密切削, オプトメカトロニクス時代の超精密切削技術, 日本オプトメカトロニクス協会, (1991) 128.
- 5) 谷 泰弘, 大島孝郎, 佐藤壽芳, 上村康幸: 磁気ディスクアルミニウム基板加工用プラスチック多孔質真空チャックの開発, 日本機械学会論文集(C), 57, 542 (1991) 3274.
- 6) 小泉幸久, 梶田正美, 永山和彦: 非球面研削加工における形状修正技術, 昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1988) 711.
- 7) 小林 昭ほか: アルミニウム合金の超精密切削, オプトメカトロニクス時代の超精密切削技術, 日本オプトメカトロニクス協会, (1991) 12.