微細構造を有するガラスレンズ成型型の 高精度加工に関する研究 (第2報)*

— マイクロフレネル溝を有する非軸対称非球面金型の高精度加工 —

山本真語** 平野 稔*** 中本圭一† 石田 徹† 竹内芳美†

Study on Precision Machining of Glass Lens Mold with Minute Structures (2nd Report)

— Ultraprecision Machining of Non-Axisymmetric Aspheric Glass Lens Mold with Micro Fresnel Shape —

Shingo YAMAMOTO, Minoru HIRANO, Keiichi NAKAMOTO, Tohru ISHIDA and Yoshimi TAKEUCHI

In recent years, the demand of optical devices with complicated and highly accurate shape such as Fresnel lens and f-q lens is growing up in terms of miniaturization and improvement of information equipments. Moreover, the demand of glass lenses increases for the purpose of improving its heat resistance and optical performances. The study proposes a machining process for non-axisymmetric aspheric cemented tungsten carbide mold with minute structures, aiming at high precision machining. In the proposed process, the non-axisymmetric aspheric surfaces except for minute structures are at first machined by the spiral form grinding tool path with a spherical resinoid bonded diamond wheel. The machined surface center is corresponding to the center of the rotation axis of ultraprecision machine tool. Afterwards, the surfaces are ground for compensation, based on all-over shape measurement interpolated by cubic spline. Then, minute structures are created on non-axisymmetric aspheric surfaces by the grinding with a disk type metal bonded diamond wheel. As a result, it is found that the proposed machining method has the potential of producing a high precision non-axisymmetric aspheric glass lens mold with minute structures effectively.

Key words: glass lens mold, non-axisymmetric asphere, cemented tungsten carbide, ultra precision grinding

1. 緒 言

近年、各種情報機器の高性能化・小型化に伴い、それらの基幹部品である光学レンズに対する複雑化・高精度化の要求が高まっている。例えば、カメラなどに使用される非球面レンズや、BD/DVDプレーヤーなどの光ディスクピックアップ用の回折レンズ、レーザプリンタ光学系に使用されるf-θレンズ等はその代表例である。

現状のところ複雑形状レンズの材料は一般にプラスチックが使用されている。これは単結晶ダイヤモンド工具を用いた軟質材料の切削加工により、比較的低コストで金型が得られるためである。しかし、高精度光学系には、プラスチックに比べ光学特性や熱特性に優れたガラスを材料とするレンズが望まれる。ガラスレンズ成型用の金型材には、高温の成形プロセスに耐えうる超硬合金などの硬脆材料を用いる必要がある。そのため、硬脆材料の複雑形状の高精度加工技術が求められている。

これらの要求に対し、需要が高いフレネル形状の加工手法として、図1に示すナイフエッジ状砥石を用いた軸対称面上への同時2軸制御加工法が提案されている¹⁾。

そこで本研究では、さらに形状が複雑である非軸対称非球面上にマイクロ溝を有する超硬合金製ガラスレンズ成型型の高精度加工方法を提案する。加工実験により手法の有用性を検証したので報告する。

2. 非軸対称非球面研削加工

2.1 加工対象形状

本研究で対象とする加工形状を図2に示す。非軸対称非球面上に楕円状輪帯をもつマイクロフレネル溝を一体化させた形状となっている。ベースとなる非軸対称非球面はある非球面式 $z = f(x, y)$ により定義され、その高低差は約1.4mmである。また、マイクロ溝の溝深さは5μmとなっている。そのため、非軸

Fig.1 Grinding of axisymmetric surface with fresnel

Fig.2 Target shape

* 原稿受付 平成21年3月23日
** 学生会員 大阪大学大学院 (大阪府吹田市山田丘 2-1)
*** 正会員 (株) ジェイテクト (愛知県刈谷市朝日町 1-1)
† 正会員 大阪大学大学院 (大阪府吹田市山田丘 2-1)

Fig.3 Experimental setup

Fig.4 Conventional tool path

Fig.5 Position of machined surface

対称非球面上への溝加工において、少しの加工位置のずれも形状に大きく影響を与えることになる。

非軸対称非球面を加工する際の工具軌跡では、図3に示すような構成（加工面はXY面に創成、Zは高さ方向）の加工機を考える場合、図4のように被加工物の長手方向やその直角方向に沿った動きを繰り返す方法²⁾が一般的である。この方法は同時3軸制御で加工が行えるため必要軸数を抑えられ、多くの超精密加工機で加工を行えるといった長所がある。しかし、図5のように工具取付け時の誤差がある場合、この方法では加工面は理想位置より工具の位置ずれ分だけ平行移動した場所に創成されることになる。この加工面上にさらにマイクロ溝を施す場合、同時4軸制御による加工が必要となるため、加工機の回転軸を使用する。そのため、回転軸の中心と加工面の中心にずれがある場合、マイクロ溝は正しく加工されない可能性がある。

図6は工具がX, Y方向にそれぞれ位置ずれがある場合の実際の加工面の理想加工面に対する形状誤差を求めたものである。このように、数ミクロンオーダーの位置ずれであっても深さ5μmのマイクロ溝加工は行えないことがわかる。そこで、この問題への対処として補正加工を行う方法が考えられるが、加工機から被加工物を取り外して加工面の形状測定を行おうとしても、理想加工面を定義できないために補正のしようがない。

そこで本研究では、図7のような加工機械の回転軸を使用した同時4軸制御による螺旋型工具経路を非軸対称非球面に適用し、検討を行った。従来の方法とは異なり、回転軸に対して加工面の中心が一致するため、加工機から取り外した場合でも理想加工面との中心あわせが容易になる。ただし、制御軸数の増加などにより各種誤差の影響が考えられるため、あわせて補正加工方法について検討を行う。

Fig.6 Influence of rotational axis shift to tool position error

Fig.7 Newly proposed spiral path

2.2 NCデータの作成

本研究では大径の球径砥石の使用を前提とする。これは、一点で研削を行う場合に比べ、加工に関与する面積を広くすることで砥石の摩耗を抑えようとするねらいからである。螺旋型に次々と加工点が移動するようNCデータを作成する。等間隔の渦巻きを得るためアルキメデスの螺旋より、極座標形式で次式のような曲線を考える。

$$r = a\theta \quad (1)$$

渦巻き間のピッチを P_x とすると、次式のように加工点の x, y 座標が求められる。

$$x = \frac{P_x}{2\pi} \theta \cos \theta, \quad y = \frac{P_x}{2\pi} \theta \sin \theta \quad (2)$$

式(2)を非球面式に代入すると、 $z = f(x, y)$ は求められる。工具中心位置を得るためには、接線ベクトル t_x, t_y を求め、その外積から法線ベクトル n を導出する。

$$t_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\partial z}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad t_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \frac{\partial z}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad n = t_x \times t_y \quad (3)$$

加工点から法線ベクトル方向に球形砥石の半径分オフセットした位置が砥石中心となる。なお、本研究では回転角 C を以下のように定義している。

$$C = \frac{180}{\pi} \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (4)$$

2.3 補正加工方法

被加工物を取り外して形状測定（3次元測定機にパナソニック（株）社製UA3Pを用いる）を行うことを前提とする。長手方向への走査を繰り返して全面測定を行い、非球面式とのZ方向の差を形状誤差として出力する。補正加工にはこの形状誤差データを用いるが、NCデータ作成時の曲面分割点と形状測定時の測定点を一致させることは不可能である。そこで、形状誤差データの補間を考え、補正加工を行う。

本研究では、走査ラインごと移動平均による平滑化処理後、走査ライン間を3次スプラインにより補間する。これにより測定データ範囲内の全ての点で形状誤差を与えることができる。NCデータを修正する際には、ある点 (X, Y, Z) の形状誤差を Z_{error} とすると、補正座標 $Z_{comp} = Z - Z_{error}$ となる。なお、複数回補正加工を行う場合は、 $Z_{comp} = Z - \sum Z_{error}$ とし、元の値からそれまで

Table 1 Grinding conditions of non-axisymmetric asphere

Workpiece	Binderless tungsten carbide F10 (FUJI DIE CO.,LTD)
Wheel	SD3000P150BPF
Rotational diameter	$\phi 25\text{mm}$
Spindle rotation	12000rpm
Depth of cut (Rough cut)	$2\mu\text{m}$
Depth of cut (Finish cut)	$1\mu\text{m}$
Feed rate	200mm/min
Grinding fluid	Oil mist

Fig.8 Whole view of workpiece **Fig.9** Shape accuracy (after the first grinding) **Fig.10** Shape accuracy (after the first compensation grinding)

の全ての形状誤差の総和の差をとるものとする。

2.4 検証実験

本研究で考案した手法を用いて加工実験を行った。超硬合金を被加工物とし、工具にはレジンボンド球形ホイールを用いた。加工条件を表1に示す。仕上げ加工時間は約7時間であった。図8に被加工物の外観を示す。UA3Pにより全面測定を行ったところ、初期研削加工後の形状精度は図9に示すように $7.62\mu\text{mRz}$ であった。

この形状誤差データを補間し、補正加工を行った。その結果、図10に示すような形状誤差をもつ加工面が生成された。さらに、2回目の補正加工を行った。その結果、図11に示すような形状誤差となった。図12 (a) は初期研削仕上げ加工後および2回の補正加工後の形状精度の変化を示したものである。形状精度は大幅に向上している。また、カーボン転写により砥石摩耗について調べた。ツルーイング・ドレッシング後と3回の仕上げ研削加工後の砥石半径のベストフィット半径に対する形状誤差は図13のようになった。なお、図中のMeasurement locationは研削砥石の接触原点からのUA3P測定位置を表している。これより、大径球形砥石使用により砥石摩耗は小さく、転写性の高い加工が行われたと考えられる。

Fig.11 Shape accuracy (after the 2nd compensation grinding) **Fig.12** Improvement of shape accuracy by the number of grinding **Fig.13** Wear volume of grinding wheel

さらに、加工面の表面観察により、加工回数による影響を調べた。被加工物の中心部分と外側部分の表面粗さを3次元表面構造解析顕微鏡 (Zygo社製NewView5022) により観察を行ったところ、Raの値は図12 (b) のように変化し、最終的に中心部分 9.4nmRa 、外側部分 5.2nmRa となった。また、図14, 15, 16は、微分干渉顕微鏡により観察したものである。中心部分では補正加工を行うことで不要な研削痕が抑えられた。外側部分ではほとんど変化は見られなかった。これらより、3回の仕上げ加工による砥石磨耗などの影響は確認されず、補正加工を行うことで良好な結果が得られた。

3. マイクロ溝研削加工

3.1 溝研削用砥石

本研究では非軸対称非球面上の溝加工に、先端角60度のナイフエッジ状メタルボンドホイールを用いる。メタルボンドホイールは、レジンボンド砥石に比べ弾性変形が少ないため、今回のように微小な切込みが必要な際には有用である³⁾。研削においては、先端の鋭利な成形は難しいため、NCデータを作成する際のモデルとして図17のような先端にあるRをもつ形状を定義しておく。加工時の構成を図18に示す。

マイクロ溝加工時に行う砥石取付けセッティングとして、Z方向の原点出しと、XY方向の中心あわせ (回転軸に一致させる) がある。定義した砥石モデルのO点がZの原点、およびXY原点に一致するよう調整を行う。ここで、先端の丸みを考慮せずこのまま加工を行うと図19 (a) のように溝の位置にずれが生じると予想

(a) Center (b) Outer
Fig.14 Micrograph of 1st ground workpiece

(a) Center (b) Outer
Fig.15 Micrograph of 2nd ground workpiece

(a) Center (b) Outer
Fig.16 Nomarski micrograph of 3rd ground workpiece

Fig.17 Wheel model

される。そこで本加工においては、図19 (b) のように先端丸みを考慮したNCデータの作成が必要となる。

3.2 NCデータの作成

対象とするモデルは楕円状の輪帯をもつため、加工点も楕円状に与える。まず、C回転軸の角度を求める。溝に対して沿う方向に砥石を位置させなければならないため、図20のように加工点を通る楕円に対して工具が接する角度を求め、C軸の回転角とする。

さらに、上記の状態から図21 (a) のように砥石の接触点Cの角度 γ を求める。ここで、加工点Mによる砥石との接触位置は図22, 23のように場合分けされるものとする。図22の凹面においては、接触点はB点となり図21ではB=Cである。また、図23に示す凸面では、接触点はD点であり、D=Cとなる。砥石の接触点Cにおける振回し径を R_c とする。図21 (b) のように接触点Cを通り、半径 R_c の円がその表面上にあり、中心Sが加工点Mの法線ベクトル上にある半径 R_c の球を定義すると、次式の関係が得られ、砥石中心点Pの座標を求めることができ、よって、NC座標が決定される。

$$R_v^2 = R_c^2 + SP^2 \quad (5)$$

なお、本研究では図24のように中心から第1輪帯を通して外側

Fig.18 Experimental setup of Fresnel grinding

(a) Original (b) Compensation
Fig.19 Shape error

Fig.20 Obtaining angle C-axis

(a) Angle γ (b) Generating sphere
Fig.21 Tool contact angle

の第20輪帯まで順に加工を行う工具軌跡を用いる。

3.3 検証実験

提案した非軸対称非球面上へのマイクロ溝加工方法の検証実験を行った。加工条件を表2に示す。工具にはメタルボンドホイールを用いた。ツルーイング・ドレッシング後の砥石先端半径を図25 (a) のようにカーボン転写により求めた。この先端半径を考慮してNCデータを作成し加工を行った。加工後の被削材外観を図26に示す。溝仕上げ加工時間は、約17時間であった。マイクロ溝加工後の砥石先端カーボン転写観察写真を図25 (b) に示す。約55μmと大きく変形している。図27に加工後の砥石先端のSEM観察画像を示す。先端に形状のくずれが見受けれる。図28は形状測定データから非軸対称非球面の差を減じて得られた溝形状データである。全面にマイクロ溝が加工されていることが確認される。図29に第1輪帯と第18輪帯での設計値と測定値の詳細な比較を行った結果を示す。なお、X方向は中心からの距離を表している。砥石先端の丸みによる削り残しがある。また、溝位置が十数ミクロンほどずれていることが確認された。これは、ナイフ

Fig.22 Concave shape

Fig.23 Convex shape

Fig.24 Tool path of Fresnel grinding

Table 2 Fresnel grinding conditions	
Workpiece	Binderless tungsten carbide F10 (FUJI DIE CO.,LTD)
Wheel	SD3000I75M40
Rotational diameter	φ 25 mm
Rotational rate	12000 rpm
Depth of cut (Rough cut)	2 μm
Depth of cut (Finish cut)	1 μm
Feed rate	80 mm/min
Grinding fluid	Oil mist

Fig.25 Cross section of carbon plate that the wheel shape was transcribed by grinding

エッジ状砥石取り付け時の位置合わせの誤差や、加工中の摩耗・変形による砥石モデルとのずれによる影響などが考えられる。

4. 結 言

楕円状輪帯からなるマイクロフレネル溝を有する非軸対称非球面ガラスレンズ成形型の高精度加工方法の提案を行い、以下の結果が得られた。

- (1) マイクロ溝加工を前提とする非軸対称非球面加工のために、螺旋型パスのNCデータ生成プログラムと形状誤差データを補間し、NCデータの修正を行う補正加工プログラムを開発した。そして加工実験を行ったところ、概ね良好な形状精度と加工面が得られた。

Fig.26 Whole view of Fresnel grinding workpiece

Fig.27 SEM image of tool nose

Fig.28 Measured data of Fresnel shape

Fig.29 Profile of edge (by UA3P)

- (2) 非軸対称非球面上へのマイクロ溝加工NCデータ生成プログラムを開発し、加工実験を行ったところ、シャープエッジ砥石先端丸みによる削り残し等は見られるが、高低差約1.4mmの曲面上に全面に渡ってマイクロ溝が確認された。今後、加工条件などの見直しが必要ではあるが、非軸対称非球面上への高精度マイクロ溝加工の可能性を示すことができた。

参 考 文 献

- 1) 山本雄士, 鈴木浩文, 森脇俊道, 沖野 正, 樋口俊郎: マイクロフレネルレンズ成形型の超精密研削(第2報)ーモリブデン製ツールによる鋭利なエッジを有する研削ホイールの精密ツールイングとフレネル形状の研削加工の高精度化ー, 精密工学会誌, 73, 6 (2007) 688.
- 2) 厨川常元, 立花 亨, 庄司克雄, 森 由喜男: 円弧包絡研削法による非軸対称非球面セラミックミラーの加工, 日本機械学会論文集(C編), 63, 611 (1997) 2532.
- 3) 藤井太一, 平野 稔, 渋谷哲郎, 石田 徹, 竹内芳美: 微細構造を有するガラスレンズ成形型の高精度加工に関する研究ー複合加工手法によるフレネル形状ガラスレンズ金型の高精度加工ー, 精密工学会誌, 74, 12 (2008) 1298.