マイクロ非球面の超精密研削に関する研究 (第2報)*

— 砥石の各種誤差要因が形状誤差に与える影響およびその補正法の検討 —

鈴木浩文** 田中克敏*** 武田 弘† 川上邦治† 西岡昌彦†

Study on Precision Grinding of Micro Aspherical Surface (2nd Report)

- Effects of Tool Errors on Workpiece Form Accuracies and Its Compensation Methods -

Hirofumi Suzuki, Katsutoshi Tanaka, Hiroshi Takeda, Kuniharu Kawakami and Masahiko Nishio

The micro precise aspherical molding dies have been increasingly required. A new grinding method and a grinding system with 45 degrees inclined rotational axis of micro grinding wheel were developed. In the grinding test, a micro wheel of resinoid bonded diamond wheel was developed and WC (tungsten carbide) aspherical molding die were tested. By the developed system, the form accuracies of about $0.1 \mu\text{m}$ P-V and the surface roughness of less than $0.03 \mu\text{m}$ Rmax were obtained and its machining feasibility was clarified. In this report, the effects of the wheel radius error and the wheel positioning errors (horizontal and vertical directions) on the workpiece form accuracies are simulated and its compensation methods are discussed. Finally, in the aspherical grinding tests, the grinding examples of tungsten carbide by using a proposed compensation methods are examined.

Key words: micro aspherical surface, resinoid bonded diamond wheel, tungsten carbide, micro wheel, effects of tool errors on workpiece form accuracy, compensation machining

1. 緒 言

近年、マルチメディアや光通信などの新しい産業が注目されており、それに伴って光通信用光学部品の需要も急激に拡大されつつある。特に、キーデバイスであるマイクロ非球面レンズのニーズが増大している。しかし、従来の縦型の非球面研削法¹⁾²⁾ではこのように微小な凹面形状の非球面を精密に研削加工することは不可能である。そこで、本研究では微小なマイクロ非球面ガラスレンズを量産するためのセラミック製成型の研削加工について研究を行った。前報¹⁾では砥石回転軸を工作物の回転軸に対して 45° 傾ける方式の斜軸研削システムを開発し、微小な非球面形状の研削加工について可能性検証を行った。ガラス成形用の型として用いられ、近似曲率半径および外径がサブミリサイズで凹面形状の超硬合金製非球面型を試作した結果、 $0.1 \mu\text{m}$ P-V以下の形状精度と $0.03 \mu\text{m}$ Ry以下の表面粗さが安定して得られ、本方法による精密加工の可能性が明らかとなった。

特に斜軸研削法によるマイクロ非球面の研削加工においては、砥石の上下(Y軸)方向のセッティング誤差、砥石の左右(X軸)方向のセッティング誤差、砥石摩耗による砥石半径の誤差などの誤差要因が、工作物の加工形状精度に顕著に影響を与え、また、工作物の寸法が微小であるため従来の縦型の非球面研削法に比べて砥石の調整が非常に困難である。そこで本報では、それらの砥石の誤差要因の影響についてシミュレーション

を行った。さらに、この計算結果を基にそれらの最適補正法を提案し、実際に超硬合金製型を用いて補正加工実験を行い、補正効果について検証を行った。

2. マイクロ非球面研削装置および研削システム

研削装置としては、図1に示す同時2軸(X,Z)制御加工機(東芝機械製ULG-100A)を用いた。Z軸案内テーブル上に主軸が横向きに取り付けられ、軸対称非球面の加工が可能である。位置決めは、温度変化による変動を抑えるためにリニア(ガラス)ス

Fig.1 Schematic diagram of proposed inclined rotational grinding system for micro aspherical surface

* 原稿受付 平成10年4月9日

** 正 会 員 防衛大学校(横須賀市走水1-10-20)

*** 正 会 員 東芝機械(株)(沼津市大岡2068-39)

† 東芝機械(株)

Fig.2 Shape of micro wheel

ケールフィードバック制御により行い、その位置決め分解能は $0.01 \mu\text{m}$ である。X軸案内テーブル上には、空気静圧軸受の回転B軸テーブルを介して高速回転の研削スピンドルを 45° 傾けて設置した。このB軸回転テーブルは砥石のツルーイング時に 90° 旋回される。また、砥石の上下方向（Y軸方向）の調整は、B軸回転テーブルの上に取り付けられたスライドテーブルにより行われる。主軸は最大回転数3000rpmの空気静圧軸受である。また砥石径が非常に小さく、周速を通常レベルに近づけるために、研削スピンドルとして最大回転数 $15 \times 10^4 \text{rpm}$ と高速回転の空気静圧軸受（東芝機械製ABC-20M）を搭載して用いた。工作物はジグを介して真空チャックにより主軸に取り付け、電気マイクロメータにより計測しながら $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以下の同軸度が得られるように調整した。

砥石は外径が非常に微小な円柱状の軸付き砥石を用い、研削加工のみで仕上げる必要から、レジンボンドダイヤモンドホイールを用いた。砥石の形状を図2に示す。この軸付き砥石はコレットチャックにより研削スピンドルに固定し、機上で単石ダイヤモンドツールによりツルーイングを行い、エッジ部を円弧形状に成形した³⁾。

3. 砥石の誤差要因が加工形状精度に与える影響およびその補正法

図1に示すような加工システムにより砥石をX軸とZ軸の同時2軸制御を行いながら軸対称の非球面を研削する場合、砥石のセッティングや砥石形状の入力値の誤差により工作物に形状誤差が生じる。縦軸の研削スピンドルの場合は、それらの誤差の算出および補正は比較的簡単に行うことができる¹⁾²⁾。しかしながら本研究における斜軸研削法の場合は砥石回転軸が 45° 傾斜しているために、それらの誤差の算出は複雑で、その補正は困難を要する。以下に、それらの誤差要因を列挙する。

- 砥石の上下（Y軸）方向のセッティング誤差
- 砥石の左右（X軸）方向のセッティング誤差
- 砥石半径の誤差

(a)の砥石の上下（Y軸）方向のセッティング誤差は工作物中心部に図3(a)に示すような切残しを生じさせる。この場合、その切残し部の半径の測定によりY軸方向の要補正量 ΔY を判定することができるが、その方向が特定できない。また、(b)の砥石の左右（X軸）方向のセッティング誤差 ΔX が存在する場合、図3(b)に示すように工作物に形状誤差が生じる。そして、(c)の砥石半径の誤差 ΔR が存在する場合も同様に、図3(c)のように工作物の形状誤差が生じる。以下ではこれらの各誤差要因が形状精度に与える影響についてシミュレーションを行い、最適な補正加工法の検討を行う。

(a) Wheel setting error in the Y axis

(b) Wheel setting error in the X axis

(c) Wheel radius error

Fig.3 The effects of wheel errors on the workpiece form

Fig.4 The effect of wheel setting error in the Y-direction on the workpiece surface pattern

3.1 砥石の上下（Y軸）方向のセッティング誤差が有る場合

工作物を研削し、中心部に生じた円すい形状の未加工部の直径の半分を上下方向に調整すればよいことがわかる。しかし、修正方向は不明である。そこで、上下方向にずれた場合の研削面の模様の変化に着目し、検討を行った。

図4(a)に示すように、砥石が工作物中心から $d/2$ 下方にある場合（ $\Delta Y = -d/2 < 0$ ）を考える。砥石径を d_0 、砥石回転速度を ω_1 とすると砥石の周速 V_1 は次式で表される。

$$V_1 = \pi d_0 \omega_1 \quad (1)$$

Fig.5 The effect of wheel setting error in the X-direction on the workpiece form error

Fig.6 The effect of wheel radius error on the workpiece form error

また、研削点の半径を r 、工作物の回転速度を ω_2 とすると工作物の回転による相対速度 V_2 は次式で表される。

$$V_2 = 2\pi r \omega_2 \quad (2)$$

通常の研削条件では、 $\omega_1 \gg \omega_2$ であるため、 $V_1 \gg V_2$ となる。すなわち、研削痕はX軸に平行に生じる。砥石を工作物の+X方向から中心方向へ送る場合、図のように工作物中心の切残し部に接するように、砥粒による引っかき痕が生じる。さらに、工作物が ω_2 の回転数で回転するため、図に示すように右回りの渦巻状の模様が生じる。一方、砥石が工作物中心から $d/2$ 上方にある場合（ $\Delta Y = d/2 > 0$ ）は、同様に図4(b)に示すように左回りの渦巻状の模様が生じる。したがって、渦巻模様の回転方向によりY軸方向の補正方向が判断できる。

3.2 砥石の左右（X軸）方向のセッティング誤差がある場合

工作物の回転対称軸の半径方向（X軸方向）に砥石セッティング誤差 ΔX が存在する場合、図3(b)に示すように工作物の加工精度に誤差が生じる。工作物上の研削点の傾き角を θ とすると、そのZ軸方向の誤差曲線 $E_{ax}(\theta)$ は近似的に次式で表される。

$$E_{ax}(\theta) = -\Delta X \cdot \tan \theta \quad (3)$$

例として球面の工作物を研削する場合を考える。例えば、曲率半径1mmの球面（凹面）の場合、砥石取付け誤差 ΔX に対応して図5に示すような形状誤差曲線が得られる。縦軸 $E_{ax}(\theta)$ は目標加工形状からの誤差で、横軸Xは工作物の半径方向位置である。また、研削点の傾き角 θ も合わせて表示する。この曲線

Fig.7 The effects of wheel setting error in the X-direction and wheel radius error on the form error

は非球面形状の係数の差異により若干異なるが、一般的に $X=0$ 付近で不連続な誤差曲線となる。 θ が最大 45° の場合、加工精度を $0.1 \mu m$ 以下に抑えるには、砥石取付け誤差 ΔX を $0.1 \mu m$ 以下の精度で調整する必要があることがわかる。

3.3 砥石半径に誤差がある場合

砥石半径 R に誤差 ΔR が存在する場合、図3(c)に示すように工作物の加工精度に誤差が生じる。工作物上の研削点の傾き角を θ とすると、そのZ軸方向の誤差曲線 $E_{ar}(\theta)$ は近似的に次式で表される。

$$E_{ar}(\theta) = -\sqrt{2} \Delta R \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (4)$$

ここで、砥石回転軸が 45° 傾いているため、 $\sqrt{2} (=1/\cos 45^\circ)$ が乗じられている。

同様に、例として球面形状の工作物を研削する場合を考える。例えば、曲率半径1mmの球面（凹面）の場合、砥石半径の誤差 ΔR に対応して図6に示すような形状誤差曲線が得られる。縦軸 $E_{ar}(\theta)$ は目標加工形状からの誤差で、横軸Xは工作物の半径方向位置である。また、研削点の傾き角 θ も合わせて表示する。この曲線は非球面形状の係数の差異により若干異なるが、一般的に $X=0$ 付近で連続な誤差曲線となる。 θ が最大 45° の場合、加工精度を $0.1 \mu m$ 以下に抑えるには、砥石半径誤差 $|\Delta R|$ を $0.17 \mu m$ 以下の精度で調整する必要があることがわかる。

3.4 砥石の左右（X軸）方向のセッティング誤差および砥石半径の誤差が複合されている場合

3.2節および3.3節では2つの要因が個別に生じる場合を示したが、実際にはこれらが複合されている。すなわち、式(3)および式(4)より誤差曲線 $E(\theta)$ が次式のように表せる。

$$\begin{aligned} E(\theta) &= E_{ax}(\theta) + E_{ar}(\theta) \\ &= -\Delta X \cdot \tan \theta - \sqrt{2} \Delta R \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

同様に例として球面の工作物を研削する場合を考える。例えば、曲率半径1mmの球面（凹面）の場合、砥石取付け誤差 ΔX および砥石半径誤差 ΔR の組合せに対応して図7に示すような形状誤差曲線が得られる。縦軸 $E(\theta)$ は目標加工形状からの誤差で、横軸Xは工作物の半径方向の位置である。また、研削点の傾き角 θ も合わせて表示する。この曲線は ΔX と ΔR の組合せにより異なり、それぞれの誤差を打ち消す場合と増加する場合が

ある。

このように砥石のX軸方向のセッティング誤差および砥石半径の誤差が複合されている場合は、研削加工後の形状誤差曲線から ΔX と ΔR を求める必要がある。以下では最小自乗法を用いてそれらの算出を行う場合を考える。

形状測定点 (θ_i, E_i) $i=1 \sim n$ の数が n 個あるとすると、式(5)は次式のように表せる。

$$E_i = -\Delta X \cdot \tan \theta_i - \sqrt{2} \cdot R \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta_i} - 1 \right) \quad (6)$$

$\Delta X=a$, $\Delta R=b$, $\tan \theta_i=T_i$, $\sqrt{2} \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta_i} - 1 \right) = C_i$ とくと次式が得られる。

$$E_i = -a \cdot T_i - b \cdot C_i \quad (7)$$

また、

$$S = \sum (E_i + a \cdot T_i + b \cdot C_i)^2 \quad (8)$$

とおき、 S を a および b で偏微分したものがゼロとなるため、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a} &= \sum 2 \cdot (E_i + a \cdot T_i + b \cdot C_i) \cdot T_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} &= \sum 2 \cdot (E_i + a \cdot T_i + b \cdot C_i) \cdot C_i = 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(9)より、最終的に次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\sum (E_i \cdot T_i) \cdot \sum (C_i^2) - \sum (E_i \cdot C_i) \cdot \sum (T_i \cdot C_i)}{\{\sum (T_i \cdot C_i)\}^2 - \sum (T_i^2) \cdot \sum (C_i^2)} \\ b &= \frac{\sum (E_i \cdot C_i) \cdot \sum (T_i^2) - \sum (E_i \cdot T_i) \cdot \sum (T_i \cdot C_i)}{\{\sum (T_i \cdot C_i)\}^2 - \sum (T_i^2) \cdot \sum (C_i^2)} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$(i=1 \sim n)$

研削加工後の形状誤差 (θ_i, E_i) $i=1 \sim n$ を式(10)に代入し、 $\Delta X(=a)$ 、 $\Delta R(=b)$ を求め、砥石原点位置 X_0' および砥石半径 R' を次式のように補正し、前報で述べたようにNCプログラムを作成し、修正加工すれば良いことがわかる。

$$\left. \begin{aligned} X_0' &= X_0 - \Delta X \\ R' &= R + \Delta R \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

4. 補正加工実験

ここでは、図8に示すように微小な非球面形状の型を試作し、上述の研削補正法の効果の検証を行った。形状は一般に用いられている非球面多項式で表され、近似曲率半径は約1.4mmであった。有効径は約 $\phi 1.5$ mmとし、最外周部の傾き角 θ_{max} は約 31° であった。材料は微粒子超硬合金(WC)である。

4.1 研削条件

研削条件を表1に示す。砥石は粒径#1200のレジンボンドダイヤモンドホイールを用いた。砥石形状は図2に示すような円柱

Fig.8 Shape of aspherical workpiece

Table 1 Grinding conditions

Wheel	Resinoid bonded diamond
Grain size	#1200
Diameter	$\phi 1.8$ mm
Rotational rate	5×10^4 rpm
Depth of cut	$0.5 \mu\text{m}$
Coolant	Soluble type
Feed rate	$0.1 \mu\text{m/rev}$

Fig.9 Grinding process for compensation

状の軸付き形状であり、エッジ部は円弧にツルーイングされる。このエッジ部の曲率半径は約0.1mmと極力小さくし、工作物と砥石の接触面積を小さくして、研削抵抗を極力抑えた。

4.2 加工プロセス（補正手順）

研削加工の補正加工の手順を図9に示す。初めに、顕微鏡により砥石の上下方向（Y軸）および左右方向位置（ ΔX ）の粗調整を行う。続いて、3.1節で述べたように平面形状のダミー材を用いて研削加工を行い、Y軸方向の精密調整を行う。次に非球面形状の工作物を研削加工し、その形状誤差曲線を測定し、3.4節で述べたように砥石の左右方向位置（ ΔX ）および砥石半径誤差（ ΔR ）の補正を行う。再び非球面形状の工作物を研削加工し、その形状誤差曲線を測定する。最後にその形状誤差曲線から砥石の微小うねりなどの誤差を補正し、最終加工を行う¹⁾。

4.3 研削実験結果

初めに、顕微鏡により砥石の上下方向（Y軸）および左右方

Fig.10 Nomarski micrographs of ground surface patterns in the workpiece center

向位置 (ΔX) の調整を行い、平面形状のダミー材を用いた研削加工面の写真から、Y軸方向の精密調整を行った。図10(a)は $\Delta Y=90 \mu\text{m}$ 、(b)は $\Delta Y=-125 \mu\text{m}$ の場合、(c)は $\Delta Y=0 \mu\text{m}$ と調整済みのものである。

次に、目標の非球面形状の工作物を研削加工し、その形状誤差曲線を測定した結果を図11に示す。形状誤差曲線は、表1の条件で10回研削した後に工作物を主軸から取り外し、先端半径 $2 \mu\text{m}$ のダイヤモンドスタイラスを備えたForm Talysurfにより測定したものである。形状精度は約 $0.22 \mu\text{m P-V}$ であった。3.4節で述べたように式(10)を用いて計算したところ、 $\Delta X=-0.71 \mu\text{m}$ 、砥石半径誤差 $\Delta R=1.86 \mu\text{m}$ であり、これらの値を用いて補正加工して測定した結果を図12に示す。微小なうねり成分が残存し形状精度は $0.11 \mu\text{m P-V}$ であった。これは砥石の微小うねり誤差に起因するものと考えられる。最後に、この測定結果を基に砥石軌跡を補正して³⁾、第3次加工を行って得られた結果を図13に示す。約 $0.06 \mu\text{m P-V}$ の形状精度が得られている。

5. 結 言

本報では、砥石回転軸を工作物の回転軸に対して 45° 傾ける方式の超精密研削法（斜軸研削法）によるマイクロ非球面研削において、砥石に関する各種誤差要因が加工形状精度に与える影響について検討した。砥石の上下（Y軸）方向のセッティング誤差、砥石の左右方向（X軸）方向のセッティング誤差、砥石摩耗による砥石半径の誤差など影響についてシミュレーションを行った。さらに、この計算結果を基にそれらの補正法について検討し、実際に超硬合金製の非球面型を用いて補正加工実験

Fig.11 Form deviation profile after primary grinding

Fig.12 Form deviation profile after secondary grinding

Fig.13 Form deviation profile after final grinding

を行い、補正効果について検証した。その結果、 $0.1 \mu\text{m P-V}$ 以下の形状精度が得られ、本補正法が有効に作用することが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) H.Suzuki, S.Kodera, T.Nakasugi, T.Ohta and K.Syoji : Precision Grinding of Aspherical CVD-SiC Molding Die, Int. J. JSPE, 32, 1 (1998) 25.
- 2) 鈴木浩文, 小寺 直, 中筋智明, 長谷川森, 原 成一: 非球面研削に関する研究, 1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1994) 799.
- 3) 鈴木浩文, 小寺 直, 前川茂樹, 森田訓子, 桜井英一, 田中克敏, 武田 弘, 厨川常元, 庄司克雄: マイクロ非球面の超精密研削に関する研究-斜軸研削法によるマイクロ非球面の鏡面研削の可能性検証-, 精密工学会誌, 64, 4 (1998) 541.