

# マイクロ非球面の超精密研削に関する研究（第4報）

—XYZ 同時 3 軸制御の研削点固定方式斜軸研削による高精度化—

山本雄士\*\*, 鈴木浩文\*\*\*, 沖野正\*\*\*, 森脇俊道\*\*\*, 福田将彦†, 西岡昌彦†, 古嶋洋一†

Study on Precision Grinding of Micro Aspherical Surface (4th Report)

- Accuracy Improvement by 3 Axes Controlled Single Point Inclined Grinding Method -

Yuji YAMAMOTO, Hirofumi SUZUKI, Tadashi OKINO, Toshimichi MORIWAKI,

Masahiko FUKUTA, Masahiko NISHIOKA and Yoichi KOJIMA

Needs of digital devices increase rapidly in recent years, and the demand for a micro axis-symmetric aspherical glass lens of large numerical aperture is expanding rapidly especially in that device. Moreover blue lasers have been increasingly used to make wavelengths short and the maximum tangent angle of the aspheric shape has increased. Therefore ultra-precision grinding technology of ceramic dies became to be a core technology. Authors have successfully developed the 45 degrees inclined grinding method, and ultra-precision micro aspherical shape has been obtained. The improvement of the form accuracy will be required because the specifications of micro lenses become more and more strict in future. However, the shape correction cannot be done satisfactorily, because the wheel wear is not equal and the grinding point on the wheel moves. In this paper, a new grinding method is proposed to solve the above problems. In this method, three-axes (X, Y, Z) are controlled simultaneously so that the position of the grinding point on the diamond wheel is fixed. Then the grinding system was developed and grinding experiments using micro symmetric aspherical dies of tungsten carbide were carried out.

**Key words:** micro aspherical surface, micro grinding with micro wheel, resinoid bonded diamond wheel, tungsten carbide, change of form accuracy, compensation machining

## 1. 緒 言

近年デジタルデバイスのニーズが急激に増大しており、特にデジタルカメラ、カメラ機能付き携帯電話、DVDピックアップ、光通信デバイスを対象にマイクロ非球面レンズの需要が急激に増加している。また同時に光学特性の優れたガラスレンズへの移行が進みつつある。これらの要求に対しては、超硬合金やCVD-SiCなどの高硬度のセラミックス型を用いたガラス成形法により量産する必要がある<sup>1,2)</sup>。そこでこれまで砥石回転軸を工作物回転軸に対して45°傾けて2軸制御する斜軸研削システムを開発し<sup>3)</sup>、微小な非球面形状の研削加工について研究を行ってきた。その結果、曲率半径および有効径がサブミリサイズで凹面形状の超硬合金製非球面型において0.1 $\mu$ mP-V以下の形状精度を得ることに成功し、本方法による精密加工の有効性を明らかにするとともに実用化を行った<sup>3,5)</sup>。

しかし最近になり、光ディスクにおける使用光のブルーレーザ化などに伴う短波長化や光学デバイスのコンパクト化のために、レンズ（凸面）の最大傾斜角が大きいものも必要となっており、これに対応すべく最大傾斜角が大きい型（凹面）の超精密研削加工技術とその更なる高精度化が必要となっている。このような金型を従来の同時2軸制御の斜軸研削法で加工する場合、砥石上の研削点が刻々と移動し、砥石摩耗の分布形状が工作物に転写されるために加工形状精度が悪くなる傾向にある。この問題点を解決するために斜軸研削ヘッドをB軸回転テーブル上に搭載し、砥石上の研削点が固定されるように駆動する方

法も提案されているものの、(1)回転テーブルの追加による位置決め精度の悪化、(2)工作物の最大傾斜角が大きい場合には砥石軸と工作物の干渉が生じるなどの問題点が一方で生じる。

そこで本報においては、上述の問題を解決するために回転B軸を用いることなく、斜軸回転するマイクロ砥石を同時3軸(XYZ)制御することにより研削点を固定化する新しい斜軸研削法を提案した。さらに本提案法を実現する3軸制御の研削加工システムを開発し、実際のデジタルカメラ用レンズの成型型を想定した超硬合金製非球面型を用いて研削加工実験を行い、この有効性について検証を行った。

## 2. 従来のクロス方式の斜軸研削法の問題点

クロス方式の斜軸研削法では、図1に示すように円柱状の砥石を工作物回転軸に対して45°傾斜させて取り付け、機上で砥

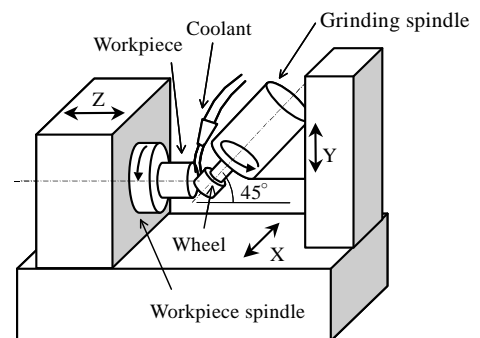


Fig.1 Schematic diagram of proposed inclined rotational grinding system for micro aspherical surface

\* 原稿受付 2005年4月4日。

\*\* 学生会員 神戸大学大学院（兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1）

\*\*\* 精密工学 雑誌大 1.72 1.73 1.74 1.75 1.76 1.77 1.78 1.79 1.80 1.81 1.82 1.83 1.84 1.85 1.86 1.87 1.88 1.89 1.90 1.91 1.92 1.93 1.94 1.95 1.96 1.97 1.98 1.99 2.00 2.01 2.02 2.03 2.04 2.05 2.06 2.07 2.08 2.09 2.10 2.11 2.12 2.13 2.14 2.15 2.16 2.17 2.18 2.19 2.20 2.21 2.22 2.23 2.24 2.25 2.26 2.27 2.28 2.29 2.30 2.31 2.32 2.33 2.34 2.35 2.36 2.37 2.38 2.39 2.40 2.41 2.42 2.43 2.44 2.45 2.46 2.47 2.48 2.49 2.50 2.51 2.52 2.53 2.54 2.55 2.56 2.57 2.58 2.59 2.60 2.61 2.62 2.63 2.64 2.65 2.66 2.67 2.68 2.69 2.70 2.71 2.72 2.73 2.74 2.75 2.76 2.77 2.78 2.79 2.80 2.81 2.82 2.83 2.84 2.85 2.86 2.87 2.88 2.89 2.90 2.91 2.92 2.93 2.94 2.95 2.96 2.97 2.98 2.99 3.00 3.01 3.02 3.03 3.04 3.05 3.06 3.07 3.08 3.09 3.10 3.11 3.12 3.13 3.14 3.15 3.16 3.17 3.18 3.19 3.20 3.21 3.22 3.23 3.24 3.25 3.26 3.27 3.28 3.29 3.30 3.31 3.32 3.33 3.34 3.35 3.36 3.37 3.38 3.39 3.40 3.41 3.42 3.43 3.44 3.45 3.46 3.47 3.48 3.49 3.50 3.51 3.52 3.53 3.54 3.55 3.56 3.57 3.58 3.59 3.60 3.61 3.62 3.63 3.64 3.65 3.66 3.67 3.68 3.69 3.70 3.71 3.72 3.73 3.74 3.75 3.76 3.77 3.78 3.79 3.80 3.81 3.82 3.83 3.84 3.85 3.86 3.87 3.88 3.89 3.90 3.91 3.92 3.93 3.94 3.95 3.96 3.97 3.98 3.99 4.00 4.01 4.02 4.03 4.04 4.05 4.06 4.07 4.08 4.09 4.10 4.11 4.12 4.13 4.14 4.15 4.16 4.17 4.18 4.19 4.20 4.21 4.22 4.23 4.24 4.25 4.26 4.27 4.28 4.29 4.30 4.31 4.32 4.33 4.34 4.35 4.36 4.37 4.38 4.39 4.40 4.41 4.42 4.43 4.44 4.45 4.46 4.47 4.48 4.49 4.50 4.51 4.52 4.53 4.54 4.55 4.56 4.57 4.58 4.59 4.60 4.61 4.62 4.63 4.64 4.65 4.66 4.67 4.68 4.69 4.70 4.71 4.72 4.73 4.74 4.75 4.76 4.77 4.78 4.79 4.80 4.81 4.82 4.83 4.84 4.85 4.86 4.87 4.88 4.89 4.90 4.91 4.92 4.93 4.94 4.95 4.96 4.97 4.98 4.99 5.00 5.01 5.02 5.03 5.04 5.05 5.06 5.07 5.08 5.09 5.10 5.11 5.12 5.13 5.14 5.15 5.16 5.17 5.18 5.19 5.20 5.21 5.22 5.23 5.24 5.25 5.26 5.27 5.28 5.29 5.30 5.31 5.32 5.33 5.34 5.35 5.36 5.37 5.38 5.39 5.40 5.41 5.42 5.43 5.44 5.45 5.46 5.47 5.48 5.49 5.50 5.51 5.52 5.53 5.54 5.55 5.56 5.57 5.58 5.59 5.60 5.61 5.62 5.63 5.64 5.65 5.66 5.67 5.68 5.69 5.70 5.71 5.72 5.73 5.74 5.75 5.76 5.77 5.78 5.79 5.80 5.81 5.82 5.83 5.84 5.85 5.86 5.87 5.88 5.89 5.90 5.91 5.92 5.93 5.94 5.95 5.96 5.97 5.98 5.99 6.00 6.01 6.02 6.03 6.04 6.05 6.06 6.07 6.08 6.09 6.10 6.11 6.12 6.13 6.14 6.15 6.16 6.17 6.18 6.19 6.20 6.21 6.22 6.23 6.24 6.25 6.26 6.27 6.28 6.29 6.30 6.31 6.32 6.33 6.34 6.35 6.36 6.37 6.38 6.39 6.40 6.41 6.42 6.43 6.44 6.45 6.46 6.47 6.48 6.49 6.50 6.51 6.52 6.53 6.54 6.55 6.56 6.57 6.58 6.59 6.60 6.61 6.62 6.63 6.64 6.65 6.66 6.67 6.68 6.69 6.70 6.71 6.72 6.73 6.74 6.75 6.76 6.77 6.78 6.79 6.80 6.81 6.82 6.83 6.84 6.85 6.86 6.87 6.88 6.89 6.90 6.91 6.92 6.93 6.94 6.95 6.96 6.97 6.98 6.99 7.00 7.01 7.02 7.03 7.04 7.05 7.06 7.07 7.08 7.09 7.10 7.11 7.12 7.13 7.14 7.15 7.16 7.17 7.18 7.19 7.20 7.21 7.22 7.23 7.24 7.25 7.26 7.27 7.28 7.29 7.30 7.31 7.32 7.33 7.34 7.35 7.36 7.37 7.38 7.39 7.40 7.41 7.42 7.43 7.44 7.45 7.46 7.47 7.48 7.49 7.50 7.51 7.52 7.53 7.54 7.55 7.56 7.57 7.58 7.59 7.60 7.61 7.62 7.63 7.64 7.65 7.66 7.67 7.68 7.69 7.70 7.71 7.72 7.73 7.74 7.75 7.76 7.77 7.78 7.79 7.80 7.81 7.82 7.83 7.84 7.85 7.86 7.87 7.88 7.89 7.90 7.91 7.92 7.93 7.94 7.95 7.96 7.97 7.98 7.99 8.00 8.01 8.02 8.03 8.04 8.05 8.06 8.07 8.08 8.09 8.10 8.11 8.12 8.13 8.14 8.15 8.16 8.17 8.18 8.19 8.20 8.21 8.22 8.23 8.24 8.25 8.26 8.27 8.28 8.29 8.30 8.31 8.32 8.33 8.34 8.35 8.36 8.37 8.38 8.39 8.40 8.41 8.42 8.43 8.44 8.45 8.46 8.47 8.48 8.49 8.50 8.51 8.52 8.53 8.54 8.55 8.56 8.57 8.58 8.59 8.60 8.61 8.62 8.63 8.64 8.65 8.66 8.67 8.68 8.69 8.70 8.71 8.72 8.73 8.74 8.75 8.76 8.77 8.78 8.79 8.80 8.81 8.82 8.83 8.84 8.85 8.86 8.87 8.88 8.89 8.90 8.91 8.92 8.93 8.94 8.95 8.96 8.97 8.98 8.99 9.00 9.01 9.02 9.03 9.04 9.05 9.06 9.07 9.08 9.09 9.10 9.11 9.12 9.13 9.14 9.15 9.16 9.17 9.18 9.19 9.20 9.21 9.22 9.23 9.24 9.25 9.26 9.27 9.28 9.29 9.30 9.31 9.32 9.33 9.34 9.35 9.36 9.37 9.38 9.39 9.40 9.41 9.42 9.43 9.44 9.45 9.46 9.47 9.48 9.49 9.50 9.51 9.52 9.53 9.54 9.55 9.56 9.57 9.58 9.59 9.60 9.61 9.62 9.63 9.64 9.65 9.66 9.67 9.68 9.69 9.70 9.71 9.72 9.73 9.74 9.75 9.76 9.77 9.78 9.79 9.80 9.81 9.82 9.83 9.84 9.85 9.86 9.87 9.88 9.89 9.90 9.91 9.92 9.93 9.94 9.95 9.96 9.97 9.98 9.99 10.00

† 東芝機械㈱（静岡県沼津市大岡 2068-39）

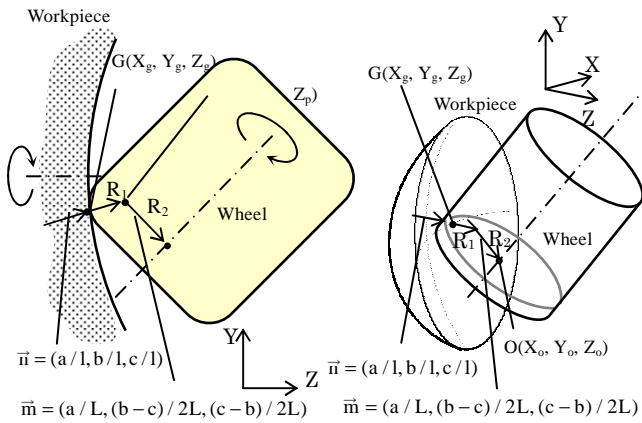


Fig.2 Calculations of wheel path in the inclined grinding method

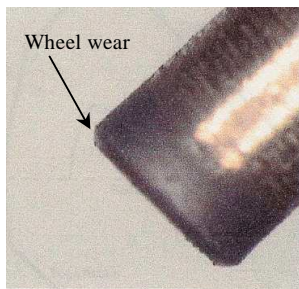


Fig.3 A typical wheel wear on 45 degrees tilted micro wheel

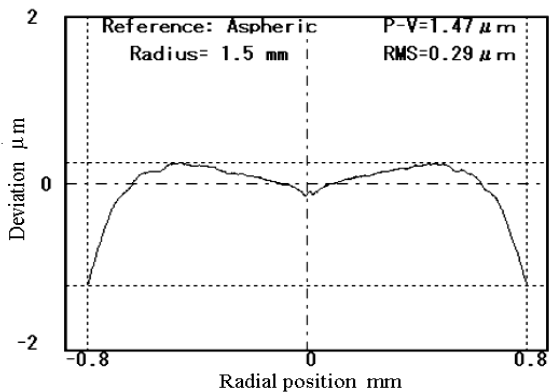


Fig.4 A typical workpiece form deviation in case of unequal wheel wear

石のエッジ部を円弧形状にツルーイングを行い、その砥石のエッジ部により研削加工される。その際、砥石軌跡は砥石回転軸が  $45^\circ$  傾斜しているため、縦軸研削法のように単純な式<sup>④</sup>で表すことができない。従来法では砥石と工作物の関係は図 2 に示すように定義して、Newton-Raphson 法を用いた数値計算を行って求めている<sup>③</sup>。しかし、非球面の半径方向位置に応じて、砥石上の研削点が刻々と移動するために、砥石のエッジ部に生じた偏摩耗 (図 3) が工作物に転写され図 4 に示すような加工形状誤差を生じる場合が多い。

例として曲率半径  $1.5\text{mm}$  の凹面形状を砥石半径  $1.0\text{mm}$ 、砥石エッジ部の曲率半径が  $0.2\text{mm}$  の砥石で加工を行なった場合において、研削点が砥石のエッジ上で移動する量を考える。図 5 に示すように、工作物上の傾斜角が  $0^\circ$  の位置で接触する砥石エッジ先端の点を基準として、そこから実際に加工を行っている砥石上の研削点までの角度を研削点の開き角  $\alpha$  と定義する。工作物上の

研削点の半径方向位置  $r$  と開き角  $\alpha$  の関係を算出した結果を図 6

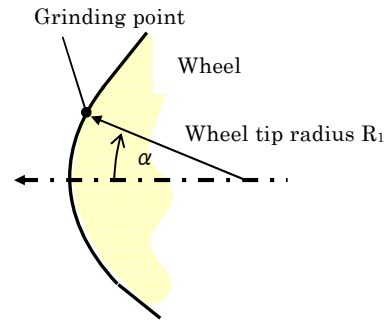


Fig.5 Definition of angle  $\alpha$  on wheel edge

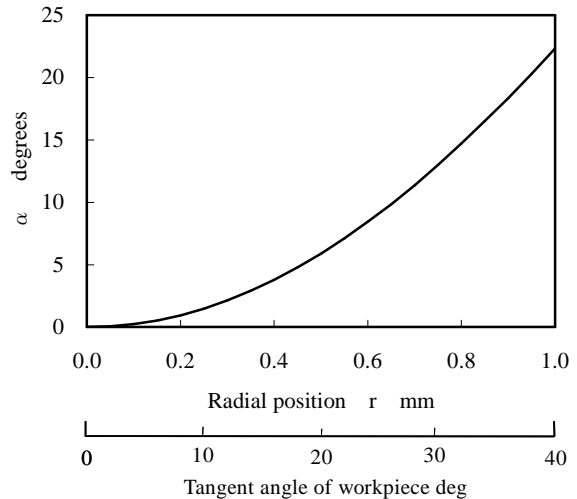


Fig.6 Relation between workpiece radial position and  $\alpha$

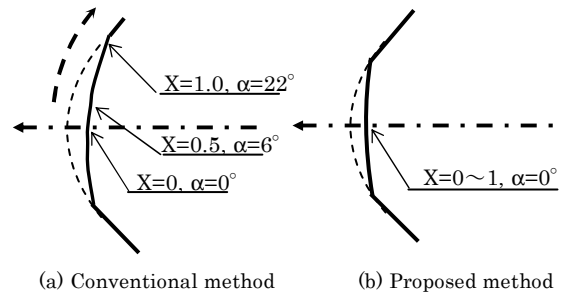


Fig.7 Changes of grinding point on wheel edge

に示す。研削点が工作物の外周方向に移動するに伴い、開き角  $\alpha$  は増加し、工作物の半径方向の位置が  $1\text{mm}$  の位置では約  $22^\circ$  まで開き角が大きくなっている。以上のように従来法では、研削点が砥石表面上を移動するため、砥石エッジ部の摩耗量の分布が工作物に転写され、工作物の形状精度に大きく影響を与える傾向にあることがわかる。砥石のエッジ部の形状がさらに大きく摩耗すると、先端が円弧形状であるという前提が成立せず、補正加工も正常に行われないため高精度の加工が不可能になる。このことは実加工事例と良く一致している。

### 3. 研削点固定法における砥石軌跡の計算

上記では従来法の問題点について考察したが、ここでは図 7(b) に示すように本報で提案する研削点固定方式の斜軸研削法における砥石軌跡の計算法について述べる。

まず、図 2 に示すように、砥石断面の円弧中心 P から砥石軸に

下した垂線の足  $O$  を工具基点と呼ぶことにし、この工具基点  $O$  と加工点  $G$  との関係誘導しなければならない。軸対称の非球面

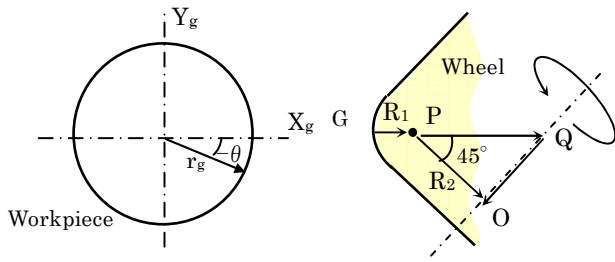


Fig.8 Calculation of wheel path in proposed method

形状関数は  $Z=f((X^2+Y^2)^{0.5})$  で表され、加工点  $G(X_g, Y_g, Z_g)$  における法線ベクトルは次式で与えられる。

$$\vec{n}(a, b, c) = \left( -\frac{\partial f}{\partial X}, -\frac{\partial f}{\partial Y}, 1 \right) \quad (1)$$

したがって、 $|\vec{GP}| = R_1$ 、 $|\vec{PO}| = R_2$  とすると、砥石断面の工具基点  $O(X_o, Y_o, Z_o)$  の座標は次式で表される<sup>3)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} X_o &= X_g + \frac{a}{l} \cdot R_1 + \frac{a}{L} \cdot R_2 \\ Y_o &= Y_g + \frac{b}{l} \cdot R_1 + \frac{b-c}{2 \cdot L} \cdot R_2 \\ Z_o &= Z_g + \frac{c}{l} \cdot R_1 + \frac{c-b}{2 \cdot L} \cdot R_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで  $l = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$ 、 $L = \sqrt{a^2 + 0.5 \cdot (b-c)^2}$  である。

$A=a/l$ 、 $B=b/l$ 、 $C=c/l$  とおくと、 $(A, B, C)$  は単位法線ベクトルを表す。研削点は半径方向位置を  $r = (X^2 + Y^2)^{0.5}$  とすると、工作物の非球面関数は図8より次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} X &= r \cdot \cos \theta \\ Y &= r \cdot \sin \theta \\ Z &= f(r) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

また、研削点の法線ベクトルは次式で表される。

$$\begin{aligned} \vec{n}(a, b, c) &= (-\partial r / \partial X, -\partial r / \partial Y, 1) \\ &= (-\partial r / \partial X \cdot df/dr, -\partial r / \partial Y \cdot df/dr, 1) \\ &= (-f'(r) \cdot \cos \theta, -f'(r) \cdot \sin \theta, 1) \end{aligned} \quad (4)$$

従来法においては工作物の中心においてのみ  $\angle QPO = 45^\circ$  の関係は成立するが、提案法では図8に示すように、常に  $\angle QPO = 45^\circ$  となるために次式が得られる。

$$\vec{PQ} \cdot \vec{PO} = |\vec{PQ}| \cdot |\vec{PO}| \cos 45^\circ \quad (5)$$

式(2)および式(5)より次式の関係が得られる。

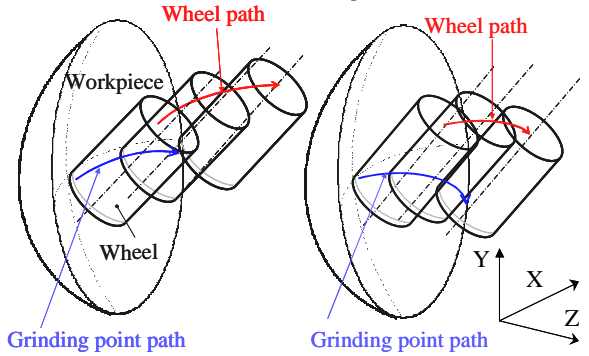
$$a^2 = 2bc \quad (6)$$

式(4)および式(6)より次式が得られる。

$$\sin \theta = \frac{1}{f'(r)} - \sqrt{\frac{1}{f'(r)^2} + 1} \quad (\text{凹面の場合}) \quad (7a)$$

$$86 \quad \sin \theta = \frac{1}{f'(r)} + \sqrt{\frac{1}{f'(r)^2} + 1} \quad (\text{凸面の場合}) \quad (7b)$$

工作物上の加工点の半径方向位置を  $r_g$  とすると、式(3)より次式



(a) Conventional method (b) Proposed method

Fig.9 Schematic diagrams of wheel path and grinding point path

Aspherical function:

$$Z(X) = \frac{C_v \cdot X^2}{1 - \sqrt{(K+1) \cdot C_v^2 \cdot X^2}} + \sum_{i=1}^n C_i \cdot X^i$$

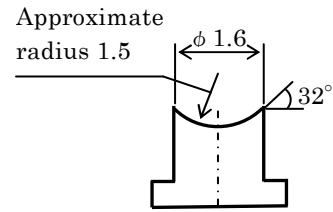


Fig.10 Shape of target aspherical molding die

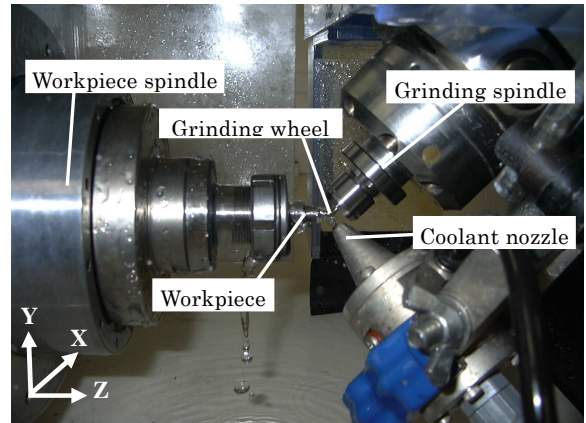


Fig.11 A view of the simultaneous 4-axes controlled grinding machine

の関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} X_g &= r_g \cdot \cos \theta \\ Y_g &= r_g \cdot \sin \theta \\ Z_g &= f(r_g) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

したがって、式(7)より工作物上の研削点における回転角  $\theta$  を求め、式(8)から研削点の座標  $G(X_g, Y_g, Z_g)$  を計算し、式(2)より砥石の基点  $O(X_o, Y_o, Z_o)$  を求めれば良いことがわかる。従来法と提案法における砥石軌跡の違いを模式的に表すと図9のようになる。

#### 4. マイクロ軸対称非球面の研削加工の実験方法

研削装置としてリニアスケールフィードバック計測制御方式の同時4軸(X, Y, Z, C)制御加工機(東芝機械製ULG-100D(SH<sup>3</sup>))を用いた。工作物には微粒子超硬合金(日本タングステン)製のマイ

Table 1 Grinding conditions

Grinding wheel	Resinoid bonded diamond
Grain size	#1200
Diameter	φ 2 mm
Rotational rate	$4 \times 10^4$ rpm
Workpiece	Tungsten carbide
Rotational rate	$3 \times 10^2$ rpm
Depth of cut	0.5 μ m/pass
Feed rate	0.3 mm/min
Coolant	Solution type

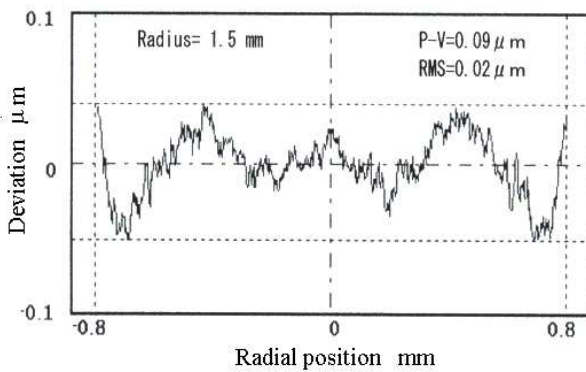


Fig.12 Form deviation profile after grinding

クロ非球面型を用いた。形状は一般に用いられている非球面多項式を用い、図 10 に示すように近似曲率半径は 1.5mm、有効径は約φ1.6mm(最大傾斜角:約 32°)とした。研削実験の様子を図 11 に示す。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を用いて計測しながら±0.5μm以下の同軸度が得られるように調整した。

研削条件を表 1 に示す。研削砥石には粒径 #1200 のレジンボンドダイヤモンドホイールを用いた。砥石は円柱状の形状とし、エッジ部は単石のダイヤモンドツルアにより曲率半径 0.2mm の円弧形状にツルーイングを施した。1 回当たりの切込みを 0.5μm とし、従来法および提案法においても補正加工は行わず、0, 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200 パス加工した後に、形状誤差曲線の変化および研削砥石の摩耗量とそのエッジの形状を評価した。形状誤差曲線は先端半径 2μm 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。また、砥石摩耗量に関しては加工後に平面形状のカーボン板を回転砥石に押し付けて湿式研削を行い砥石の先端形状のレプリカを採取し、それを非接触方式形状測定器(三鷹光器製 NH-3)により測定し、初期状態(0 パス)との差を算出した。

## 5. 実験結果

本提案法により非球面ガラスレンズの成形型の超精密研削を行った。その結果を図 12 に示す。約 0.09μmP-V の形状精度が得られ、従来法と同等の精度で加工できていることが確認された。また、中心部付近の研削面のノマルスキー顕微鏡写真を図 13 に示

す。延性モードの良好な研削面が得られていることが確認できる。

次に、表 1 に示す条件で任意のパス回数を加工した後の形状誤差の変化を図 14 に示す。初期状態において約 0.09μmP-V であった形状誤差が、従来の 2 軸制御法による加工では 200 パス加工後



Fig.13 Nomarski micrograph of ground surface

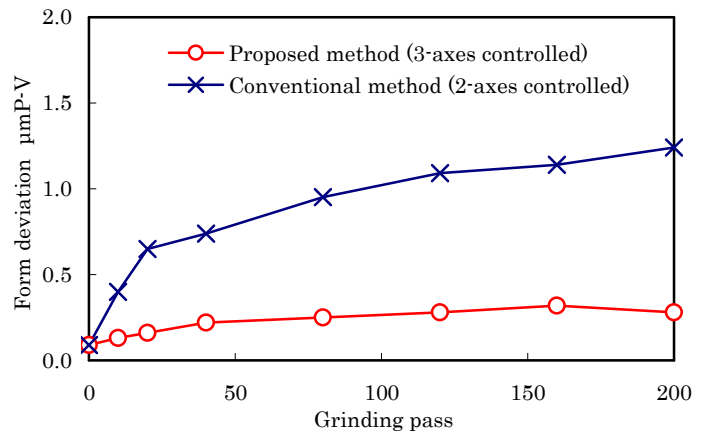


Fig.14 Changes in form deviation with designed radius of conventional and proposed method

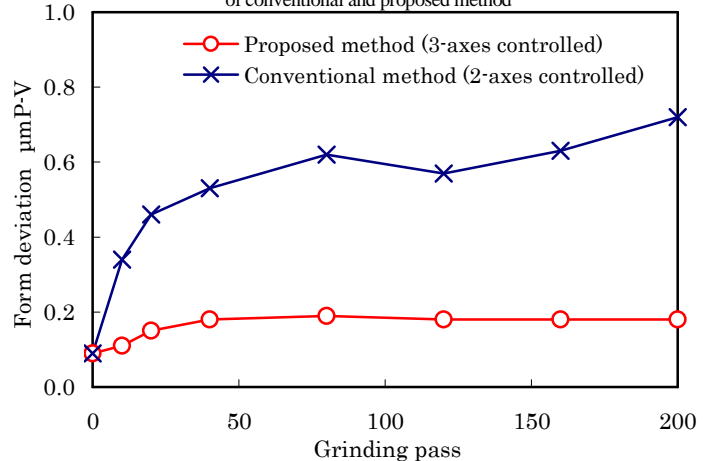


Fig.15 Changes in form deviation with best fitting radius of conventional and proposed method

(20 個の金型の仕上げ加工に相当)で約 1.3μmP-V まで悪化した。それに対して、提案の 3 軸制御法においては約 0.3μmP-V と形状



精度の悪化が抑えられていることが確認される。

図 14 では設定非球面形状を基準とした絶対基準評価で計算したが、図 10 の球面項の曲率  $C_v$  は実用上においては若干の相違が許される。そこで、近似曲率半径を固定せずに算出した形状誤差曲線の変化を図 15 に示す。200 パス後の形状誤差は従来法では約

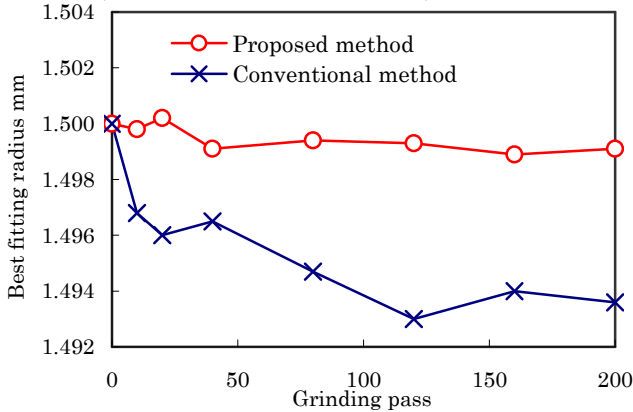


Fig.16 Changes in best fitting radius of conventional and proposed method

0.7 $\mu$ mP-V の形状誤差に達しているのに比べ、提案法では約 0.2 $\mu$ mP-V にまで改善されている。また、その時の近似曲率半径 ( $1/C_v$ ) の変化を図 16 に示す。近似曲率半径も結果的には提案法の方が設計値に対して変化が少ないことがわかる。

また、図 17 に砥石エッジ部の摩耗量の変化を示す。任意のパス回数研削加工後に平面形状のカーボン板を回転砥石に押し付けて計測し、評価したものである。一般的には提案法の方が研削点を固定しているために摩耗量は大きくなっている。初期摩耗は従来法および提案法の両方とも大きいものの、切込み回数が 40 パスを越えると安定していることがわかる。また、提案法においては摩耗量が増加する懸念があったが、40 パス以降では砥石摩耗量は 10 パスあたり 0.1 $\mu$ m とそれほど小さくなく、研削点を固定しても、加工中の研削砥石の摩耗が形状精度に及ぼす影響はわずかであるといえる。

最後に砥石エッジ部の形状を確認するために、200 パス加工後の砥石先端の形状を顕微鏡により機械上で観察した。その結果を図 18 に示す。従来法では砥石エッジ部が広い範囲で摩耗しているために、先端形状が斜めに摩耗している。それに対して提案法では、研削点が砥石先端に固定されており砥石摩耗は先端に集中しているために、Z 軸方向に平行に摩耗していることが確認できる。このように提案法では、研削点を固定して加工を行うために砥石に局所的に摩耗量が大きいが、砥石上の研削点は固定され非球面形状の工作物の形状誤差への影響は少なくなっている。さらに実用的には補正加工を毎回行い形状の更なる向上を狙うが<sup>4)</sup>、その場合も補正加工がより良好に行なえる効果が期待できる。

## 6. 結 言

本報では、斜軸の研削スピンドルを回転 B 軸に搭載すること無く、同時 3 軸 (XYZ) 制御することにより研削点を固定化する新しい斜軸研削法を提案した。さらに本提案法を実現する 3 軸制御の研削加工システムを開発し、実際のデジタルカメラ用レンズの成形型を想定した超硬合金製非球面を用いて研削加工実験を行い、その有効性について検証を

行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 本提案法における初期の工作物の形状精度は約 0.09 $\mu$ mP-V となり、従来法と同等の形状精度を得ることができる。
- (2) 非球面形状の工作物を 200 パス (20 個の金型の仕上げ加工に相当) 研削加工して、従来の研削点移動法と比較したところ、提案法においては形状精度が良好になる。

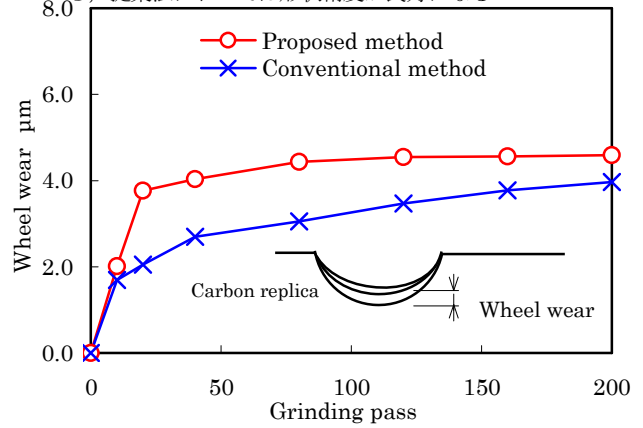


Fig.17 Changes in wheel wear of conventional and proposed method

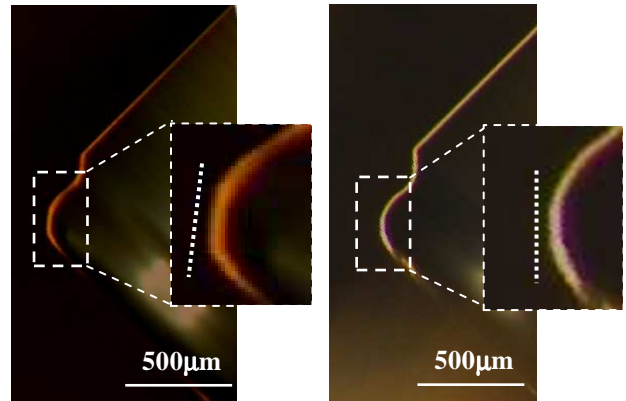


Fig.18 Wheel tip shape after 200 passes of grinding

- (3) 砥石の摩耗量は、提案法の方が局所的には大きくなるが、砥石上の研削点が一定となるため、形状精度の悪化にはあまり影響しない。

## 参 考 文 献

- 1) 鈴木浩文, 鎌野利尚, 樋口俊郎, 谷岡鉄也, 島村和弘, 横山三自, 北嶋孝之, 奥山繁樹: マイクロフレネルレンズのガラス成形—成形条件による形状転写性の実験的検討および成形試作—, 精密工学会誌, **67**, 3 (2001) 438.
- 2) 鎌野利尚: 高精度ガラス成形とマイクロレンズ, 機械と工具, **44**, 9 (2000) 98.
- 3) 鈴木浩文, 小寺直, 前川茂樹, 田中憲司, 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) 619.
- 4) 鈴木浩文, 田中克敏, 武田弘, 河上邦治, 西岡昌彦: 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—, 精密工学会, **64**, 8 (1998) 1211.

- 5) 鈴木浩文, 厨川常元, 庄司克雄, 田中憲司, 関 紀旺, 和嶋 直, 田中克敏, 見義一兄: マイクロ非球面の超精密研削に関する研究(第 3 報)―斜軸研削における非球面(凹面)の微小化の検討―, 精密工学会誌, **64**, 9 (1998) 1350.
- 6) H.Suzuki, S.Kodera, T.nakasuji, T.Ohta and K.Syoji: Precision Grinding of Aspherical CVD-SiC Molding Die, *Int.JJSPE*, **32**, 1 (1998) 25.