

論文 Article

## 非球面創成研磨技術の開発

原稿受付 2010年4月30日

ものづくり大学紀要 第1号 (2010) 2~7

藤澤 政泰

ものづくり大学 技能工学学部 製造技能工学学科

## Development of Generating Technique of Aspheric Surface with Polishing

Masayasu FUJISAWA

Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists

## Abstract

In a conventional processing, aspheric surface was generated with precision grinder, and its surface roughness is  $0.4 \mu\text{m}$ . So the surface roughness has improved to  $0.01 \mu\text{m}$  by constant pressure polishing. However, accuracy of aspheric shape has deteriorated by the polishing. Then I have developed a new polishing technique which generate accurate aspheric surface within  $0.1 \mu\text{m}$  deviation by controlling density of polishing pad path.

**Key Words** : Aspheric Surface, Polishing, Generating

## 1. 諸言

非球面はカメラのレンズやX線ミラーなどに使われ、その高性能化に著しく貢献しており、形状精度は数10ナノメートルに達している。1990年代にガラスモールドレンズ<sup>1)</sup>が実用化されるに至り、非球面レンズの量産が可能になった。モールドには超硬製の金型を使う。金型は位置決め分解能がサブナノメートルの研削盤で加工され、後工程の研磨加工で面粗さを向上している。研磨加工では、形状精度が劣化するが、熟練技能者によって精度劣化を抑制している。

光学レンズは、今後、さらなる高性能化が進み、研磨加工における形状精度劣化は許容されず、むしろ形状精度の向上が必要になると推定される。そこで考えられるのが創成研磨である。創成研磨は、目的の非球面形状との偏差を研磨パッドで部分的に除去加工し、形状精度を向上する方法であ

る。

そこで、本研究では軸対称非球面を創成する研磨技術を開発した。創成研磨は、非球面の形状精度を向上するだけでなく、数億円という高価な非球面創成研削盤による前加工を不要にする。つまり、汎用のNC研削盤による前加工でも、創成研磨によって目的の精度の非球面を加工できることを意味し、劇的なコストダウンが可能となる。

## 2. 非球面創成研磨技術

軸対称ではない2次元の非球面では、創成研磨を使っている報告があるが、汎用性に乏しく、かつ問題があるため、ほとんど使われていない<sup>2)~6)</sup>。創成研磨は部分的に研磨するため、研磨パッドの軌跡密度を制御しなければならない<sup>3)~6)</sup>。2次元の創成研磨における軌跡密度の計算には2種類の方法がある。1つは、フーリエ変換のコンボリュ

ーションを使う方法であるが、研磨パッドの研磨量分布を一定として計算し、研磨場所や研磨時間への依存性を考慮できないため、通常の光学レンズのように曲率の差が大きい非球面には適用できない。2 つめは、研磨パッド径を極小化し、目的形状との偏差を研磨パッドの研磨能率で除して軌跡密度を求める方法である<sup>2)</sup>。この方法では、コンボリューション法での問題は生じないが、研磨能率のバラツキに起因した微小波長のうねりが生じる。

そこで、本研究では目的形状との偏差を最小にするアルゴリズムで、研磨パッド軌跡密度の計算方法を考案した。これによって、研磨場所依存性に起因した形状誤差や微小波長のうねりの問題を解消した。

## 2.1 2次元の非球面における研磨パッド軌跡密度計算法（従来法）

非球面創成研磨の技術的問題は、形状偏差から研磨パッド中心の軌跡密度（以降、単に軌跡密度と記す）を計算する問題に帰着できる。軌跡密度  $d(x, y)$  はフーリエ変換とデコンボリューションを使って、以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} d(x, y) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int D(h, k) e^{j(hx+ky)} dh dk \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int \frac{E(h, k)}{P(h, k)} e^{j(hx+ky)} dh dk \end{aligned}$$

ただし

$$E(h, k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e(x, y) e^{-j(hx+ky)} dx dy$$

$$P(h, k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int p(x, y) e^{-j(hx+ky)} dx dy$$

$$D(h, k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int d(x, y) e^{-j(hx+ky)} dx dy$$

$$D = \frac{E}{P}$$

$$e(x, y) = \int d(x - x_0, y - y_0) p(x_0, y_0) dx_0 dy_0$$

$e(x, y)$  : 形状偏差  $e(x, y) = z_0(x, y) - z(x, y)$

$z_0(x, y)$  : 目的形状

$z(x, y)$  : 研磨前形状

$p(x, y)$  : 研磨パッド研磨量分布

離散的にフーリエ変換を計算する場合、フーリエ級数として計算するが、次数を3~4桁で打ち切ることが多い。上記のように2次元で計算する場合、正方形の領域において直角座標で計算する。しかし、円形の非球面では、研磨と無関係な部分を含めて計算するため、高次の級数を無視することによる誤差が生じる。しかも2次元であるため、計算が膨大になる。このような理由で曲率の差が大きい非球面には適用しがたい。

## 2.2 軸対称非球面における研磨パッド軌跡密度計算法（開発法）

2.2.1 研磨パッド研磨量分布 円形レンズのように軸対称なワークは、回転させながら超精密研削盤で加工する。回転方向の形状偏差は、半径方向の形状偏差の1/10以下であるため、創成研磨では、半径方向にのみ軌跡密度を変化させればよい。これによって、計算効率だけでなく研磨の効率も飛躍的に向上する。半径方向の軌跡密度を計算するには、研磨パッド研磨量分布、すなわち図1のように、ワークだけが回転し、研磨パッドを半径方向に動かさない場合の研磨量分布を計算する必要がある。この計算は次のようになる。

図1より、研磨パッドとワークの相対速度、すなわち、研磨速度  $v$  は

$$v = 2\pi \sqrt{r^2(n_w - n_p)^2 + r_0^2 n_p^2 + 2r r_0 \cos\theta(n_w - n_p)n_p}$$

となり、単位時間当たりの研磨距離  $s(r, r_0)$  は

$$\begin{aligned} s(r, r_0) &= n_w \int_0^T v dt \\ &= 2\sqrt{a + bE}(k, \varphi) \end{aligned}$$

ただし  $E(k, \varphi)$  : 第2種楕円積分

$$T = \frac{\varphi}{\pi n_w}$$

$$\cos 2\varphi = \frac{r_0^2 - r_p^2 + r^2}{2r_0 r}$$

$$a = 4\{r^2(n_w - n_p)^2 + r_0^2 n_p^2\}$$

$$b = 8rr_0(n_w - n_p)n_p$$

$$k^2 = \frac{2b}{a+b}$$

となる.  $n_p \geq n_w$  又は  $n_p \leq 0$  のときは

$$s(r, r_0) = 2\sqrt{a-b}\{E(k) - E(k, \pi/2 - \varphi)\}$$

$$\text{ただし } k^2 = \frac{-2b}{a-b}$$

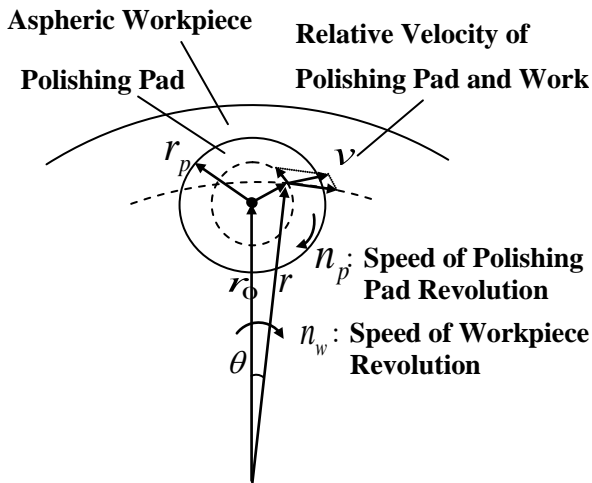


Fig. 1 Calculation Model of Polishing

となる. したがって, 研磨パッド研磨量分布

$p(r, r_0)$ は

$$p(r, r_0) = k_p q s(r, r_0)$$

ただし

$r$ : ワーク半径方向位置

$r_0$ : 研磨パッド中心位置

$k_p$ : 研磨剤, 研磨パッド材質, ワーク材質で  
定まる比例定数 (プレストンの定数<sup>7)</sup>)

$q$ : 研磨圧力

とあらわされる.

2.2.2 研磨パッド軌跡密度 フーリエ変換を使ったデコンボリューションで, 軸対称の軌跡密度を, 半径方向の1次元で計算するのは解析的には不可能である. そこで, ワーク半径方向に研磨パッドの位置を変え, その研磨量分布を重ね合わせたとき, 目標研磨量分布との偏差が最も小さくなる重ね合わせかたを計算することによって, 軌跡密度を計算する方法を考案した. この方法は有限項の行列計算であり, 境界付近での計算誤差もきわめて小さくすることができる.

本方法では, 目標研磨量分布  $e_i$  と研磨量分布  $u_i$  の偏差の2乗和  $\varepsilon = \sum (e_i - u_i)^2$  を最小にする軌跡密度  $d_j$  を求める.  $\varepsilon$  を最小にするには,  $d_j$  による偏微分が0となる  $d_j$  を求めればよい. したがって,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \vec{d}} &= \frac{\partial}{\partial \vec{d}} \sum_i (e_i - u_i)^2 \\ &= \frac{\partial}{\partial \vec{d}} \left\{ \sum_i e_i^2 - 2 \sum_i e_i u_i + \sum_i u_i^2 \right\} \\ &= \frac{\partial}{\partial \vec{d}} \left\{ \sum_i e_i^2 - 2 \sum_i e_i \left( \sum_j d_j p_{i-j,j} \right) + \sum_i \left( \sum_j d_j p_{i-j,j} \right)^2 \right\} \\ &= \frac{\partial}{\partial \vec{d}} \left\{ \sum_i e_i^2 - 2 \vec{d}' P' \vec{e} + \vec{d}' P' P \vec{d} \right\} \\ &= -2 P' \vec{e} + 2 P' P \vec{d} = 0 \end{aligned}$$

ただし

$e_i$ : 目標研磨量分布,  $\vec{e} = \{e_i\}$

$\vec{d}$ : 軌跡密度ベクトル,  $\vec{d} = \{d_i\}$

$p_{i,j}$ : 研磨パッド研磨量分布

$$p_{i,j} = p(i \delta r, j \delta r)$$

$\delta r$ : ワーク半径方向離散化間隔

$i$ : ワーク半径方向位置 No,

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$$

$j$ : 研磨パッド中心位置 No

$$u_i = \sum_j d_j p_{i-j,j}$$

$$P = \begin{pmatrix} \bar{p}_0 \\ \bar{p}_1 \\ \vdots \\ \bar{p}_i \\ \vdots \\ \bar{p}_n \end{pmatrix}$$

$$\bar{p}_i = (0 \cdots 0 p_{m,i-m} p_{m-1,i-m+1} \cdots p_{-m,m+i} 0 \cdots 0)$$

$$m : m = \frac{r_p}{\delta r}$$

$r_p$  : 研磨パッド半径

$$\bar{u} = \{u_i\} = P \bar{d}$$

となり、軌跡密度ベクトル  $\bar{d}$  は

$$\bar{d} = (P^t P)^{-1} P^t \bar{e}$$

となる。上記計算から分かるように、研磨パッドの研磨量分布  $p_{i,j}$  はワーク半径の関数であり、研磨能率の加工場所への依存性を織り込むことができる。特に非球面の曲率が半径方向に大きく変化する場合、研磨パッド面との曲率差が研磨能率に影響するため、この計算が不可欠である。上記計算に使う研磨パッド研磨量分布は2.2.1節の楕円積分ではなく、実験値を使うこともできる。研磨能率と研磨速度の比例関係が成立しない場合、実験値を使うことによって軌跡密度の計算精度を向上することができる。また、非球面の周方向に目的形状との偏差がある場合、つまり、2次元で軌跡密度を制御する必要がある場合でも、同様のアルゴリズムで計算することができる。

前記計算式に基づいて軌跡密度を求め、研磨を実行するNCコード作成プログラムを開発した。

### 3. 実験方法

#### 3.1 非球面形状測定方法

非球面の形状測定には触針式測定機（Taylor Hobson 製 Form Talysurf S2）を使い、測定結果のテキストファイルをパソコンに転送した。パソコン

ンでは、このファイルに基づいて軌跡密度を計算し、研磨用のGコードのプログラムを出力した。

#### 3.2 研磨試料

研磨試料として、非球面創成機（東芝機械製 ULG100）を用いて、直径 50mm 深さ 2mm の回転放物面を形成した図 2 のアルミニウム製ワーク（JIS A2011）を用いた。

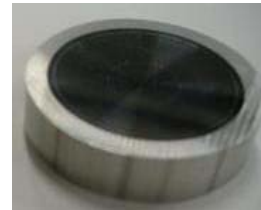


Fig. 2 Aspheric Workpiece

#### 3.3 研磨パッド

研磨パッド材質として、不織布、発泡ポリウレタンおよびポリウレタンの3種類の研磨特性を調べ、直径 8mm の研磨パッドで創成研磨実験をした。

#### 3.4 研磨方法

研磨装置(Roland 製 PNC3200)を図 3 に示す。開発したプログラムを実行して出力したGコードのファイルを本装置に転送し、スラリーを滴下しながら研磨した。円形の非球面では、一般的に、ワークと研磨パッドを自転させながら、ワーク半径方向に研磨パッドを移動させて研磨する。これに対し、本装置はNCフライスであるため、ワークを回転させる代わりに研磨パッドを公転させて研磨した。



Fig. 3 Polishing Machine

## 4. 実験結果

### 4.1 研磨量のバラツキ

研磨において創成形状精度を劣化させる大きな要因は研磨量バラツキである。研磨加工そのものが砥粒の加工作用の統計的現象であるため、研磨量バラツキの発生は不可避であるが、研磨条件によってバラツキが異なる。そこで、各種研磨パッドの研磨特性を調べた。

GC#4000 を 20wt%含むスラリーで研磨した結果を図 4、図 5 に示す。研磨量は研磨回数に比例して増大し、不織布が最も研磨能率が高く、ポリウレタンの研磨能率が低いことがわかった。一方、研磨量のバラツキは図 5 に示すように、研磨回数の平方根に比例して増大していることがわかった。これは一回毎の研磨量のバラツキ方が独立な確率現象であることを示している。

研磨量のバラツキはポリウレタンが最も小さく、研磨量バラツキと研磨量の比率もポリウレタンが最も小さい。そこで非球面創成研磨ではポリウレタン製研磨パッドを用いた。

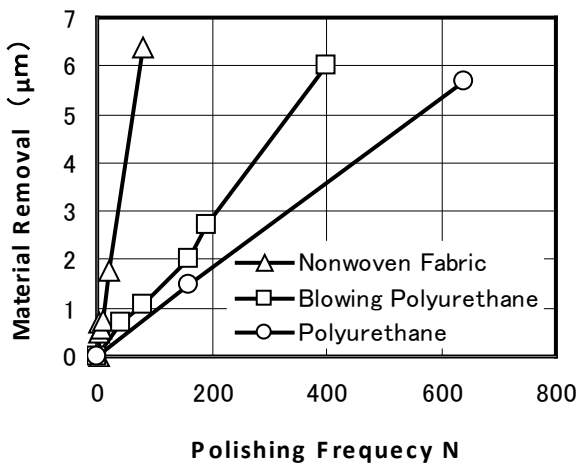


Fig. 4 Material Removal Varying Proportionately with Polishing Frequency

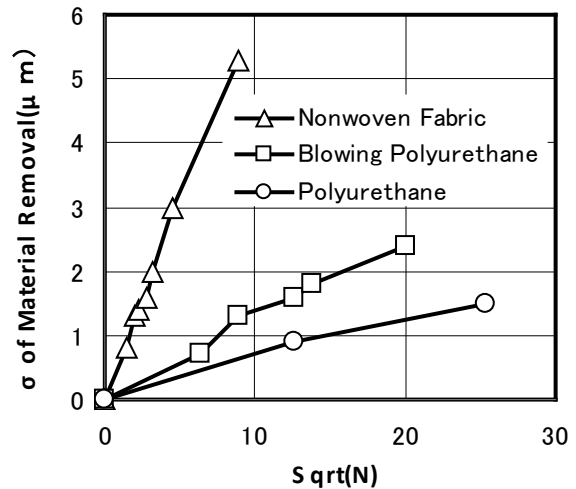


Fig. 5 Relationship between Square Root of Polishing Frequency(N) and Standard Deviation( $\sigma$ ) of Material Removal

### 4.2 非球面創成研磨

前節で示したように、研磨量バラツキは確率的現象であり、研磨毎のバラツキ方が独立である。このため、総研磨量と同じであれば、一回の研磨量が少ないほどバラツキが小さくなる。そこで研磨能率が GC#4000 の 1/10 以下である粒径  $0.1 \mu\text{m}$  のダイヤモンド砥粒を使って、研磨した。研磨面の表面粗さも GC#4000 が  $0.5 \mu\text{m Rmax}$  であるのに対し、 $0.03 \mu\text{m Rmax}$  に向上した。本実験では、仕上げ形状との偏差の 1/2 を目標に研磨した。その結果を図 6 に示す。目標の仕上げ形状に収斂し、 $0.1 \mu\text{m}$  以内の形状精度になった。

以上のごとく、本研磨法によって非球面を創成

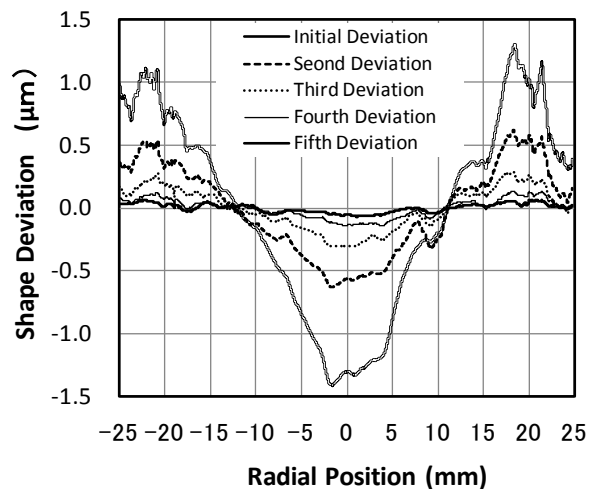


Fig. 6 Improvement in Accuracy of Aspheric Surface with New Polishing Technique

## 5. 結 言

創成研磨は、目的形状との偏差を研磨パッドで部分的に除去加工する。従来は、研磨パッドの軌跡密度を、フーリエ変換を使ったコンボリューションによって計算しているため、一般的な軸対称の非球面には使えなかった。コンボリューション法には、研磨パッド研磨量分布の研磨位置依存性を考慮できない問題もあった。そこで下記軌跡密度計算法とそれに基づく創成研磨法を開発し、以下の結果を得た。

- (1) 目的の非球面形状との偏差を極小化する研磨パッド軌跡密度計算アルゴリズムを考案し、研磨プログラムを開発した。
- (2) 上記プログラムを組み込んだ創成研磨によ

って、非球面を  $0.1 \mu\text{m}$  の精度で加工できることが分かった。

## 文 献

- 1) 寺井良平：最近の特許動向に見る低融無鉛ガラスレンズの精密プレス技術, マテリアルインテグレーション, 18,9 (2005) 45
- 2) 鈴木・樋口・北嶋・奥山：マイクロ非球面の精密研磨に関する研究, 砥粒加工学会誌, 44, 3, (2000) 126
- 3) 山本碩徳：超精密研磨加工, 光技術コンタクト, 30, 5, (1992) 267
- 4) 潟岡泉：非球面研磨加工技術, 精密工学会誌, 64, 7, (1998) 983
- 5) R.Aspden et al:Computer Assisted Optical Surfacing Applied Optics,11,12(1972)2739
- 6) R.A.Jones,R.L.Plante:Rapid Fabrication of Large Aspheric Optics,SPIE,571(1985)84
- 7) F.W.Preston:The Theory an(d Dsign of Plate Glass Polishing Machines,J.Glass Thechnology, 11,44(1927)214.