定切込み方式 NC 超精密研磨に関する研究*

——平面研磨特性と加工液粘性の影響——

坂 谷 勝 明** 黒 部 利 次*** 廣 崎 憲 一**

Study on Ultra Fine NC Polishing with Constant Cutting Depth
-Surface Polishing Characteristics and Influence of Viscosity of Polishing Compound-

Katsuaki SAKAYA, Toshiji KUROBE and Kenichi HIROSAKI

A new method of numerically controlled ultra fine polishing for brittle material is proposed. In this method, the offset of the polisher to the designed profile is controlled to be constant in non-contact, and the feed rate of polisher is fixed instead of polishing load. In this report, the surface polishing characteristics of this method and the influence of the viscosity of polishing compound are examined theoretically and experimentally. The following results are obtained: (1) When the clearance between the polisher and the work surface exceeds the definite value, the machining action does not occur. (2) The flow rate of polishing compound at the gap between the polisher and the work surface, and the stock removal rate are independent of the viscosity of polishing compound. (3) Observations of surface textures with roughness tester and AFM indicate that the surface roughness of polished surface is improved with the increase of the viscosity of polishing compound.

Key words: ultra fine polishing, numerically controlled polishing, non-contact polishing, viscosity, polishing compound, brittle material, AFM, surface roughness

1. 緒 言

最近のオプトエレクトロニクス機器の発展に伴って、これらに使用される非球面レンズなどの光学部品の生産には安価で高能率な加工法が求められている。通常このような光学部品の加工では、まず CNC 研削により形状創成を行い、その後に研磨により形状修正と表面粗さの仕上げを行う方法が採られる。現在、光学レンズなどのぜい性材料の仕上げ加工として提案、開発されている研磨法には、EEM、フロートポリシング、メカノケミカルポリシング、FFF、電気泳動研磨などの非接触型の超精密ポリシング加工法がある^{1)~4)}。これらの加工法は、一定の荷重をポリシャに加えて研磨するいわゆる定圧方式の研磨法である。このような定圧方式の研磨法では、研磨量をポリシャの滞留時間によって制御しているため、外乱の影響などを受けやすく、また、形状修正を行うにはあらかじめ測定した取り代に対応してポリシャの送り速度を制御する必要がある。

本研究は、定切込み方式の非接触型超精密研磨法を提唱し、それを高精度な NC 加工機械に適用することにより、多品種少量生産に適する非球面レンズなどの曲面最終仕上げ加工システムを実現しようとするものである。

本報では、提案した定切込み方式非接触研磨における加工液の流動および砥粒の運動状態について考察するとともに、金属製の回転ポリシャを使用した 2 軸 CNC 方式の非接触型表面研磨装置によるぜい性材料の平面研磨実験を行って、基本的な研磨特性や加工液粘性の影響を調べた結果から、本方法の可能性について明らかにする。

2. 定切込み方式非接触表面研磨法概念

定圧方式の非接触研磨法では、微細砥粒を分散させた加工液中で、ポリウレタンなどの柔軟性のある工具（ポリシャ）を一定の加工圧を加えながら回転させ、そのときに発生する流体潤滑状態によってポリシャと加工面間に流体膜によるわずかなすき間を形成し、ポリシャと加工面の非接触状態を実現している。この方法によりある大きさの表面を研磨するためには、あらかじめ測定した前加工面形状と設計値との偏差から、加工面上の各点における取りしろを算出し、その値に基づいて各点でのポリシャ滞留時間（移動速度）を NC により制御して、加工面上を順次走査しながら加工を行うものである。

本研究では、柔軟性のあるポリシャの代わりに金属性のポリシャを使用し、それを一定速度で前加工面とわずかなすき間を保つようにしながら、設計値形状に沿って走査することにより研磨を行う。このとき、設計値との偏差が大きい箇所ではポリシャと加工面間のすき間が小さくなるため加工量は大きくなる。逆に、すき間が大きくなると加工量は減少し、結果として所定の設計値形状を得ることが可能になる。

3. 加工液および砥粒の運動解析

本実験に使用したポリシャは円盤状で、それと加工面のすき間に発生する三次元的流れのレイノルズ基礎方程式は、ポリシャの回転中心および厚さの中央を原点とする図 1 に示す円筒座標 (r, a, z) 系を用いると次のようになる⁵⁾。

$$\frac{\partial}{\partial a} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{dp}{da} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{dp}{dz} \right) = 6U \frac{\partial h}{\partial a} \quad (1)$$

* 原稿受付 平成 6 年 12 月 12 日

** 正 会 員 石川県工業試験場（金沢市戸水町ロ-1）

*** 正 会 員 金沢大学工学部（金沢市小立野 2-40-20）

Fig. 1 Coordination

ただし、 μ ：加工液粘性係数， dp/da ， dp/dz ：円周方向および軸方向圧力こう配， h ：ポリシャと加工面のすき間， U ：ポリシャの外周速度である。

ポリシャを用いた非接触型の研磨法では，ポリシャと加工面の間のわずかなすき間に発生する流体の流れを利用して加工を行う。したがって，加工作用に主に寄与するのは円周方向の流れであると考えられるので，ここでは，ポリシャをX軸方向に長い無限円筒として，次の仮定のもとにポリシャの円周方向の二次元流れを考える。

- ①加工液はニュートン流体で，非圧縮性である。
- ②加工液の慣性力は粘性力に比較して小さく，無視できる。
- ③すき間内の流れは層流で，粘性は一定である。
- ④加工液膜の厚さ方向に圧力は変化しない。
- ⑤固体表面と加工液の間にすべりは生じない。

ポリシャの円周方向の流速 u_a は，次式で表され，円周方向の圧力こう配が小さい場合には単純なせん断流れとなる。また，最小すき間の位置で速度こう配が最も大きくなる。

$$u_a = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{da} \{ r^2 - (2R+h)r + R(R+h) \} + U(R+h-r)/h \quad (2)$$

ここで， R ：ポリシャの外周半径である。

また，単位幅あたりの流量 Q は次式で表される。

$$Q = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{dp}{da} \quad (3)$$

いま，ポリシャと加工物間のすき間の大きさ h について，最小すき間を h_0 として放物線近似を行うと，ポリシャ-加工面に発生する圧力 p の分布は次のようになる⁶⁾。

$$p = \frac{6\mu U(2Rh_0)^{1/2}}{h_0^2} \left\{ A + \frac{\sin 2A}{2} + \frac{\pi}{2} + 1.2258 \left(\frac{3A}{4} + \frac{3\pi}{8} + \frac{\sin 2A}{2} + \frac{\sin 4A}{16} \right) \right\} \quad (4)$$

ここで， $\tan A = (R+h_0) \tan a / (2Rh_0)^{1/2}$

また，圧力こう配は次のようになる。

$$\frac{dp}{da} = \frac{6\mu U(R+h_0)}{h_0^2} \left\{ 1 + \cos 2A + 1.2258 \left(\frac{3}{4} + \cos 2A + \frac{\sin 4A}{4} \right) \right\} (\cos^2 A + \frac{2Rh_0}{(R+h_0)^2} \sin^2 A) \quad (5)$$

式(4)から粘性係数 μ が高い場合と低い場合の圧力分布を求めるとは図2のようになり，加工液粘性が高いほどポリシャ-

Fig. 2 Pressure and flow between the polisher and the work surface

加工面間の圧力は高くなるのがわかる。しかし，式(2)，(5)から流速分布は粘性によらず一定となり，すき間が最小の位置での流速分布は図2のようになる。また，式(3)，(5)から，加工液の流量は加工液粘性によらず一定となることがわかる。したがって，単位時間あたり加工量は，ポリシャ-加工面間の砥粒の通過量すなわち加工液流量に比例すると仮定すれば，加工能率は加工液粘性に影響を受けないと考えられる。

次に，せん断流れ中の砥粒の円周方向および半径方向の移動運動は式(6)，(7)で与えられる。

$$m \frac{dv_a}{dt} = 3\pi \mu d(u_a - v_a) + F_a \quad (6)$$

$$m \frac{dv_r}{dt} = 3\pi \mu d(u_r - v_r) + F_r \quad (7)$$

ここで， m ：砥粒の質量， d ：砥粒の直径， $u_{a,r}$ ：流体の速度， $v_{a,r}$ ：砥粒の速度， $F_{a,r}$ ：外力である。

砥粒が完全な浮遊状態にある場合，砥粒に作用する重力と浮力のはり合っていると考えられるので，半径方向の外力は次式で表される⁷⁾⁸⁾。

$$F_r = -1.62(u_a - v_a)d^2(2\rho_f\mu\omega)^{1/2} + \frac{\pi}{6}(\rho_p - \rho_f)d^3 \frac{v_a^2}{r} \quad (8)$$

ここで， ω ：砥粒の自転角速度， ρ_f ：流体密度， ρ_p ：砥粒密度である。この右辺第1項は砥粒の自転による揚力，第2項は遠心力を表しているが，砥粒の円周方向の速度は流体の速度とほぼ等しいとすると，外力は第2項の遠心力のみが作用することになる。この場合，式(7)から砥粒の半径方向の速度は加工液粘性が高いほど遅くなり，加工面に作用する砥粒の入射角は小さくなると推察される。

4. 実験装置および方法

実験に使用した研磨装置の外観を図3に示す。装置は2軸CNC方式でX，Z軸は静圧油スライドと静圧油ねじから構成されており，各軸の最小送り単位は $0.1\mu\text{m}$ である。主軸は静圧空気軸受スピンドルで，その先端に外径65mm，厚さ10mm，外周面Z方向曲率半径5mmの鋼製円盤状ポリシャが取り付けられている。ポリシャの外周面は，研磨装置上でのダイヤモンドバイトを用いた切削加工により，表面粗さ $0.2\mu\text{m}$ 以内，半径方向の振れ $0.3\mu\text{m}$ 以内に仕上げられている。装置のテーブル上には，上下微動台が固定され，その上に加工液を満たすためのステンレス製研磨槽が取り付けられている。加工試料は，研磨槽底部に接着剤により固定される。ポリシャ-加工面間の最小すき間は

Fig. 3 Schematic diagram of polishing setup

Table 1 Polishing condition

Work	Si-wafer(111) 10mm×10mm×0.6mm Float glass 13mm×13mm×1.3mm
Grain	Colloidal silica Dia.:70-95nm Concentration: 40wt%
Solvent	Distilled water Glycerin
Concentration of colloidal silica	50vol%
Revolution number of polisher	100-400rpm
Feed rate of polisher	2.5-40mm/min

1 μ mで、その検出、調整は電気マイクロメータと上下微動台により行い、非接触状態の確認は、ポリシャー加工工間の通電により行った。

加工は、ポリシャをXまたはZ方向に直線状に移動する溝加工と、X、Z方向に走査するトラバース研磨を行い、同一条件について5回繰り返した。加工試料は、AFM観察用以外はポリシ加工した10×10×0.6mmのシリコンウエハを使用し、AFM観察用は13×13×1.3mmのフロート板ガラスを用いた。砥粒は、粒径70～95nmのコロイダルシリカ（砥粒濃度40wt%）を用いた。溶媒はイオン交換水とグリセリンを使用し、コロイダルシリカを体積比で50%混入した。加工条件を表1に示す。

加工した溝の形状測定には触針式表面粗さ計（Rank Taylor Hobson社製、触針先端半径2 μ m、荷重1mN）を用い、表面微細形状測定には触針式超精密表面粗さ測定機（Rank Taylor Hobson社製、触針先端0.2 μ m角、荷重0.01mN）およびAFM（Digital Instruments社製）を用いた。また、加工液粘性係数はストレス制御式レオメーター（Carri-Med社製）により測定した。

5. 実験結果および考察

5.1 加工特性

図4は、時計方向および反時計方向に回転させたポリシャをX方向に1mm離して、ポリシャー回転速度300rpm、送り速度2.5mm/minでZ方向に溝加工し、その2本の溝のX方向の断面形状

Fig. 4 Profile of polished grooves

Fig. 5 Relation between feed rate of polisher and polished groove depth

を測定した結果である。各溝の最低部の間隔はちょうど1mmになっており、加工が最も速く進行する位置は最小すき間部すなわち加工液の速度こう配が最大の位置であることがわかる。また、溝形状はエッジ部を除けば最低部に対してほぼ左右対象になっており、加工液の流入側と流出側での加工量の差はほとんどみられない。加工液流入口付近のエッジのだけは、平行流れからせん断流れへの移行によるものと考えられる。また、図5はポリシャー回転速度300rpmでX方向に溝加工したときの、送り速度と加工深さの関係を示しているが、溝深さは送り速度の増大につれて徐々に減少している。図4の左右の溝および図5のアップカットとダウンカットの溝の深さの差は、研磨装置の移動軸と加工面の平行度誤差によるものである。図6は、Z方向の溝加工における溝幅とポリシャー回転速度の関係を示す。ポリシャのZ方向送り速度は、単位時間当たり一定の2.5mm/minの場合とポリシャの1回転当たり一定の8.33 μ m/revの場合の2種類で行った。いずれの場合も、溝の幅はポリシャの回転速度に

Fig. 6 Relation between width of groove and rotational speed of polisher

Fig. 7 Relation between clearance and polished groove depth

よらずほぼ一定となっており、加工が進行する領域はポリシャの回転速度すなわち加工液の流速に依存しないことがわかる。次に、ポリシャ加工面間のすき間の大きさと加工深さの関係を調べるため、加工面をZ方向に水平に対して $1\mu\text{m}/2\text{mm}$ の割合で傾斜させ、ポリシャ回転速度300rpm、送り速度2.5mm/minでZ方向の溝加工を行った。図7は加工した溝の幅中央部のZ方向の断面形状を測定した結果で、ポリシャ加工面間のすき間の大きさと溝深さの関係として表してある。この場合、すき間が $5\mu\text{m}$ を超えるとほとんど加工が行われていないことがわかり、最小すき間が一定値を超えると加工作用が進行しないと考えられる。

以上の結果では5回の繰返しの際のばらつきは標準偏差で10%以下であった。このことから、定切込み定速送り方式によるNC超精密研磨は可能であり、高精度な制御性をもつ加工機械を用いれば非球面などの修正研磨加工に適用できると考えられる。

5.2 加工液粘性の影響

加工液の粘性と加工能率の関係について調べるため、加工液のグリセリン混入率を変えて、シリコンウエハ表面でZ方向に長さ5mmの溝加工を行った。図8は、溝深さを測定し、グリセリンを混入しない場合の深さに対する割合を加工量率として、グリセリン混入率との関係を調べた結果である。図から、加工能率は加工液粘性の影響をほとんど受けないことがわかる。このことは、加工量がポリシャ加工面間の加工液流量に比例し、

Fig. 8 Relation between volume rate of glycerin and stock removal rate number

Fig. 9 Traverse polishing

Fig. 10 Influence of volume rate of glycerin on surface roughness and viscosity of polishing compound

式(3)、(5)によって示された流量が粘性に依存しないという結果と一致する。

次に加工液の粘性の表面粗さへの影響について調べるため、加工液にグリセリンを混入して2mm角の範囲を図9に示すX方向送り、送り速度10mm/min、送り間隔 $20\mu\text{m}$ 、ポリシャ回転速度300rpmでトラバース研磨し、Z方向に加工面の表面粗さを測定した。繰返しによる表面粗さのばらつきはほとんどなく、グリセリン混入率と表面粗さおよび加工液粘性率の関係は図10の

Fig.11 Polished surface profile

(a) Glycerin:0vol%

(b) Glycerin:50vol%

Fig.12 Microtopography of polished surface measured by AFM

ようになった。表面粗さは、加工液粘性率が増加するにつれて小さくなっている。また、図11は図9のX方向送りおよびZ方向送りでトラバース研磨した面のZ方向の粗さ曲線である。表面粗さは、X方向送りに比べZ方向送りの方が小さくなるが、いずれの場合もグリセリンを混入した方が良くなっている。さらに、微小領域の表面状態を調べるため、フロート板ガラス表面の2mm角の範囲をX方向送りによりトラバース研磨し、その表面微細形状をAFMにより測定した。この結果を図12に示す。図の奥行き方向がポリシャの回転および送り方向と一致する。図から、加工液粘性が小さい場合、ポリシャ送り方向に直角な方向の形状に不規則性が顕著に現れているが、粘性が高くなる

と一様になっている。以上に示したように、加工液粘性が増大すると加工面の表面粗さが小さくなる原因としては、式(7)、(8)からわかるように粘性が高くなると、砥粒のポリシャ半径方向の移動速度が小さくなり、加工面への砥粒の衝突角度が水平方向に近くなって、加工面の応力場の寸法が小さくなったことが考えられる⁹⁾。

6. 結 言

非球面レンズなどの最終仕上げ加工に適用するための定切込み方式NC超精密研磨法を提唱し、その可能性について検討するため、加工液の流動状態および砥粒の運動状態を理論的に考察するとともに、試作した研磨装置によるぜい性材料の平面研磨実験を行って以下のような結論を得た。

- (1) 加工作用は、ポリシャと加工面のすき間が最小の位置で最も大きく進行し、エッジ部を除けば、加工液の流入側と流出側での差はほとんどない。また、すき間の大きさが一定以上になると、加工作用はほとんど進行しない。
- (2) アップカットとダウンカットの研磨深さの差はほとんどない。また、研磨溝幅はポリシャの回転速度に依存しない。
- (3) 研磨量は加工液粘性の影響を受けないが、これはポリシャ加工面間における、加工液の流速分布および流量が加工液粘性によらず一定となるためと推察される。
- (4) 加工液にグリセリンを混入して粘性を高くすると、表面粗さは混入率の増大につれて小さくなることが明らかとなった。これは、粘性の増大により砥粒の加工面への衝突角度が小さくなるためと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 谷口紀男：ナノテクノロジーの基礎と応用，工業調査会，(1988) 103.
- 2) 黒部利次，高山昌也，中田邦夫，上田修治：電気泳動現象利用による表面研磨(F F F) (第2報) —加工圧付与による窒化けい素の研磨—，精密工学会誌，54，9 (1988) 1685.
- 3) T. Kurobe and O. Imanaka: Magnetic Field Assisted Fine Finishing, Prec. Eng., 6, 3 (1984) 119.
- 4) 坂谷勝明，黒部利次，戸島 靖，廣崎憲一：電気泳動現象を利用した光学ガラスの超精密研磨，精密工学会誌，60，7 (1994) 984.
- 5) 岡本純三，中山景次，佐藤昌夫：トライボロジー入門 摩擦・摩擦・潤滑の基礎，幸書房，(1990) 94.
- 6) 森 勇蔵，井川直哉，奥田 徹，杉山和久，山内和人：EEM(elastic emission machining)による超精密数値制御加工法 —流体の挙動解析と膜圧分布—，精密機械，49，11 (1983) 1540.
- 7) 粉体工学会編：粉体工学便覧，日刊工業新聞社，(1986) 344.
- 8) 粉体工学の基礎編集委員会編：粉体工学の基礎，日刊工業新聞社，(1992) 207.
- 9) 森 勇蔵，井川直哉，杉山和久，奥田 徹，山内和人：EEM(elastic emission machining)の基礎研究 (第2報) —応力場から見た格子欠陥の発生，増殖の可能性—，精密機械，51，6 (1985) 1187.