

微細圧力制御による微小領域の形状修正研磨*

黒部利次** 山田良穂** 酒井直人*** 上田修治† 新宮克喜†

Local Area Polishing of Glass by Fine Pressure Controlling

Toshiji KUROBE, Yoshinori YAMADA, Naoto SAKAI, Shuji UEDA and Katsuyosi SHINGU

Local area polishing has been done by using a newly-developed fine pressure controlling machine. Fine pressure yielded by repulsive magnetic force between an electromagnet and permanent one, has proved to be excellent polishing performance on the optical glass. Polishing rate at any point on the workpiece should depend on the shape of a pad as well as the polishing condition, such as relative motion of polishing pad and workpiece. In the present study focusing on the reduction of surface waviness in the order of nanometer, the effects of pad shape on the polishing characteristics are experimentally and analytically examined. It is found that the profile of polished surface can be controlled by the shape of the polishing pad, and that the developed technique is very effective in the modification of the surface profile in nanometer scale.

Key words: local area polishing, pressure-controlled, repulsive magnetic force, surface profile, pad shape

1. はじめに

近年、LSIのリソグラフィにおけるステップレズやSORにおけるX線反射鏡といった光学部品の加工精度は一段と厳しくなっており、超精密加工が要求される場合が多い。特に、ナノメートルスケールの表面創成に関しては、これまで種々の加工法が開発されてきているが、解決しなければならない高度な技術的問題も多い^{1)~6)}。

VTR用非球面レンズの加工では、まず素材をNC制御非球面研削で形状創成をする。NC制御研削した面の形状精度は約±500nmであり、また、振幅が300nm程度、周期がミリメートルオーダーのうねりが存在する。NC制御研削の後、粘弾性体ポリシヤを空気圧によりワークと接触させることで均等な圧力で研磨する方法(均等研磨)等により、その形状を崩さないように研磨することが行われている。しかし、エキシマレーザステップレズやX線応用光学ミラー等の非球面においては、さらに高い形状精度や微小なうねりの除去が必要となると考えられ、上述の均等研磨法のみで必要な形状精度を達成することは容易ではない。そこで、必要な形状精度を得るために、必要な部分のみを必要量だけ研磨し所望の形状を得る、いわゆる修正研磨が有効な研磨法の一つとなるものと思われる。図1にその概念図を示す。

本研究は、オンマシン状態での修正研磨によるナノメートルスケールでの超精密研磨法の開発を目的としているが、これに先立って微小領域の形状修正研磨(LAP: Local Area Polishingと名称)に関する基礎的知見を得るために、微小パッド貼付の研磨ヘッドを有し、反発磁気力によって微細に加工圧力を制御可能な研磨装置を試作して、LAPにおける研磨の基本的特性を調べることにした。特に、研磨荷重、研磨速度、研磨面形状等について実験的検討を行った。

つぎに、修正研磨について解析的検討を行った。これは、必要研磨量を得るための研磨条件の決定に関するものであるが、ここではその基礎的検討として研磨形状の計算機シミュレーション解析を行った。この研磨形状は研磨速度などに依存するのみならず、研磨パッドの形状にも依存すると考えられる。とりわけ、微小領域を小さな研磨パッドで研磨するLAPにおいてはこの影響はことのほか重要であると考えられる。そこで、ここでは、仕上面形状に及ぼすパッド形状の影響について特に注目し、実験および解析の両面から検討を行った。

2. 実験方法

2.1 研磨装置

開発した微細圧力制御研磨装置は、研磨圧力として反発磁気力を利用している。本装置は反発磁気力発生部、回転機構部および研磨槽部の三つの主要部から構成されている。研磨圧力は電磁石と永久磁石間の反発磁場によって発生し、この反発力は

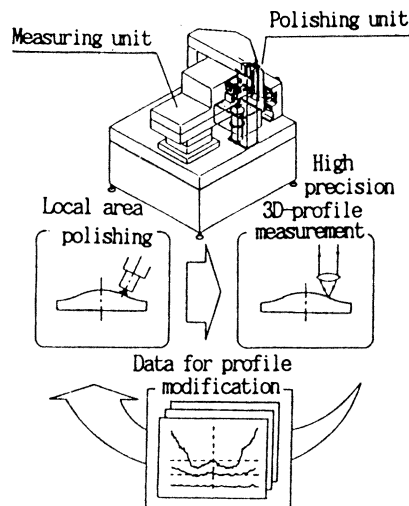


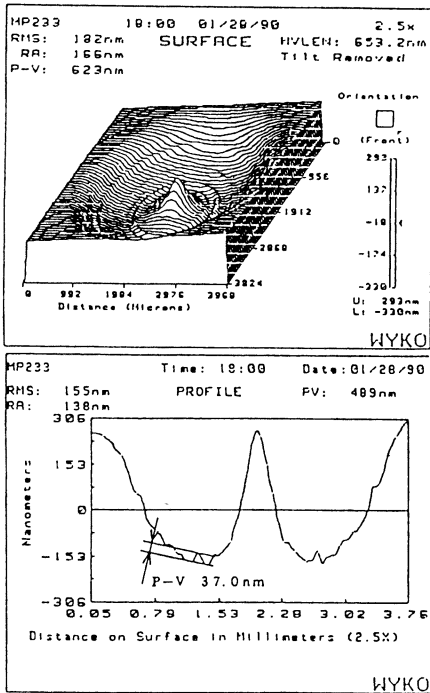
Fig.1 Concept of the local area polishing

* 原稿受付 平成6年3月16日

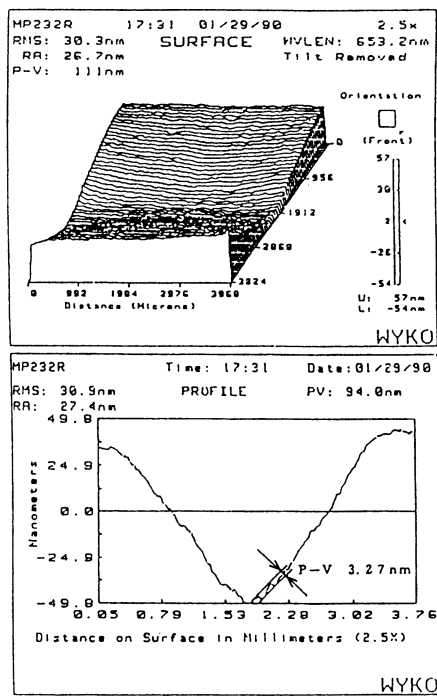
** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

*** 金沢大学工学部

† 正会員 松下電器産業(株)(門真市松葉町2-7)



(a) without revolving a work ($\omega_2 = 0\text{rpm}$)



(b) with revolving a work ($\omega_2 = 50\text{rpm}$)

Fig. 4 Typical examples of profile of polished surfaces: circular pad, $P=0.06\text{N}$, $t=20\text{min}$

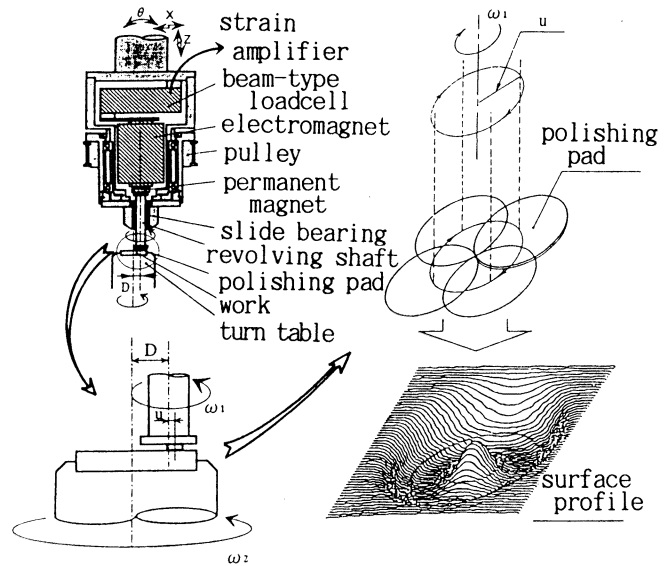


Fig. 2 Local area polishing machine

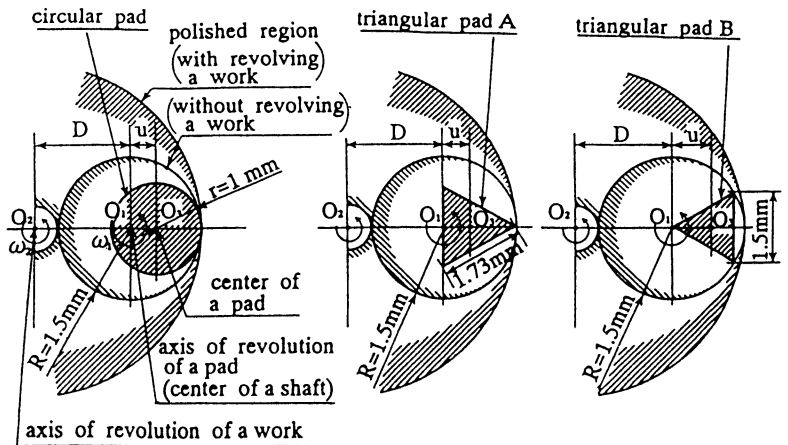


Fig. 3 Pad shape and polished region

2.2 研磨方法

実験に供した試料は光学ガラスBK-7である。直径 20mm，厚さ 5mmの形状のものを試片としている。研磨パッドは，シリコンウエハの鏡面仕上に通常使用されている発泡ポリウレタンシートに類似のものを使用した。発泡層の厚さは 0.4mmである。NC 研削面でのうねりの大きさと同程度のサイズであって形状の異なる 3種類のパッドを用意して実験に供した。一つは直径 2mm の円形(円形パッド)であり，他の二つは一辺が1.73mm(三角形パッド A)と1.5mm(三角形パッド B)の正三角形である。これらパッドをシートからパンチにより打ち抜いて作成し，図 3

Table 1 Polishing condition

Variable	circular pad	triangular pad
Revolving speed of a pad ω_1	120—240 rpm	60—140 rpm
Revolving speed of a work ω_2	0, 50 rpm	0, 25 rpm
Polishing time t	10—30 min	20 min
Load P	0.02—0.1 N	0.2—0.6 N
Eccentricity u	0.5 mm	0.5 mm (pad A) 0.87mm (pad B)
Distance between two axes of revolution D	5 mm	5 mm

図 2 に示すビーム型ロードセルによって検出される。

永久磁石を取り付けてある回転シャフトの他端面に研磨パッドが貼付してあり，この研磨ヘッドおよび回転テーブルはステッピングモータによってそれぞれ独立に回転するようになっている。また，研磨ヘッドは X, Z 方向および傾角 θ について精密な位置決めが可能となっている。ワークは研磨槽内の回転テーブル上に載置される。

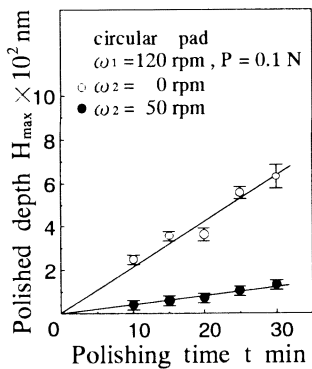


Fig. 5 Relationship between polished depth and polishing time

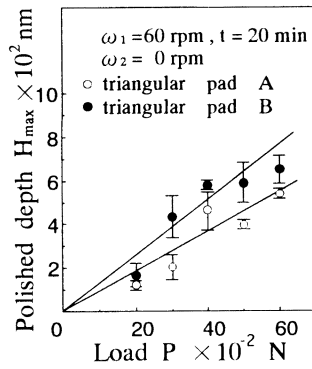


Fig. 6 Relationship between polished depth and load (without revolving a work)

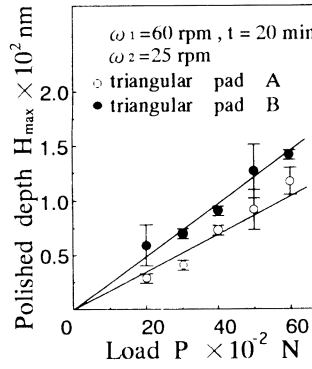


Fig. 7 Relationship between polished depth and load (with revolving a work)

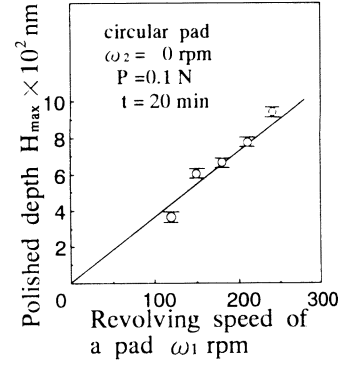


Fig. 8 Relationship between polished depth and revolving speed of a pad

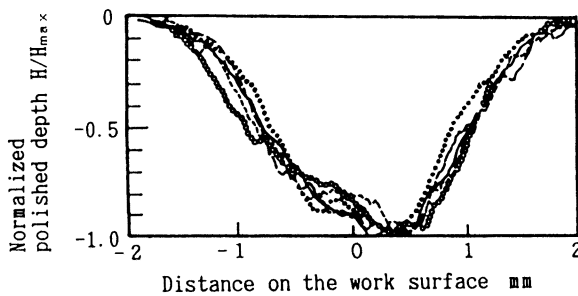


Fig. 9 Surface profiles polished with various loads: triangular pad A; ----- 0.2N, ——— 0.3N, ○○○○○○ 0.4N, ●●●●●● 0.5N, ——— 0.6N

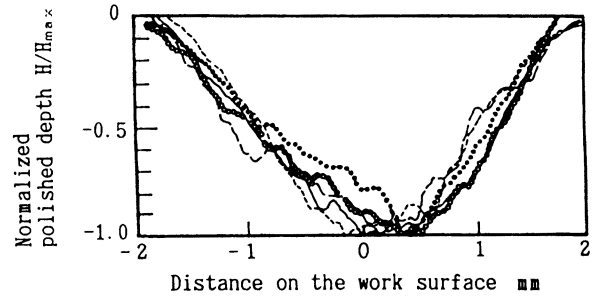


Fig. 10 Surface profiles polished with various loads: triangular pad B; ----- 0.2N, ——— 0.3N, ○○○○○○ 0.4N, ●●●●●● 0.5N, ——— 0.6N

に示すようにワーク回転中心 O_2 に対してパッド回転中心 O_1 が距離 D だけ偏芯した状態でワーク面と接触するように貼付した。また、いずれのパッドでも研磨可能な幾何学的領域は同一となるが、研磨領域内の各点においては、パッドとの接触時間(研磨距離)はパッド形状に依存して異なってくる。

研磨条件を表1に示す。研磨条件は三角形パッドAとBとでは同じであるが、円形パッドの場合には三角形パッドの場合より、研磨荷重を小さくして実験を行った。研磨ヘッドおよび回転テーブルはそれぞれ独立に回転速度 ω_1, ω_2 rpmでもって回転する。実験はワークを回転した場合としない場合の両方について実験を行った。スラリーは、粒径約 $1\mu\text{m}$ の酸化セリウム(CeO_2)砥粒 10wt%を蒸留水に懸濁したものであり、研磨中を通じてワーク面上に連続的に約45cc/minの割合で滴下した。研磨後の表面プロフィールを非接触光学式表面形状測定器(TOPO-3D, WYCO Co.)によって測定した。研磨量は測定したプロフィールの断面形状から計算によって求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 研磨の基本特性

図4に研磨面のプロフィールの一例を示す。ワークを回転した場合には、全体の研磨形状はワークの回転中心に関して回転対象な円環状の溝となる。図4(b)の上の図は溝形状の一部を示しており、また、下の図は溝の断面形状を示している。

図4(b)のワークを回転した場合の方が図4(a)のワークを回転しない場合よりも仕上面の粗さは減少し、PV値で10nm以下になっており、また、研磨深さは100nm以下と小さいことがわ

かる。

図5に研磨量と研磨時間、図6と図7に研磨量と研磨荷重との関係を、また、図8にパッド回転速度と研磨量との関係を示す。ここで、研磨量は、研磨形状のプロフィールから求めた最大研磨深さである。これらの図に示したように、研磨量は研磨の時間、荷重、速度といった変数に対して比例的に増加することがわかる。比例性に関しては、ワーク回転のない場合では約100nmの偏差があるが、ワーク回転のある場合には、約 $\pm 25\text{nm}$ の偏差である。また、図6および図7において同一荷重における研磨量を見ると、パッドBの場合にパッドAの場合より大きく、研磨量がパッド形状の影響を受けることもわかる。さらにワークを回転した場合の研磨量は回転しない場合より小さくなっており、このことは、ワーク上の研磨位置での研磨時間が短いことに対応している。

3.2 研磨面のプロフィール

図9および図10に、それぞれ三角形パッドAとBの場合について研磨荷重をパラメータとして研磨したときの研磨面のプロフィールを示してある。形状の比較のために各プロフィールを最大研磨量で規格化してある。パッドAとB、いずれのパッドの場合にも荷重変化に対してプロフィールの半値幅にして0.3mm程度の違いが見られるが、その形状はほぼ同一であって研磨荷重の影響は小さいと言える。また、研磨時間や研磨速度を変えた場合にも、半値幅にして同程度の違いが見られたがプロフィールの形状には大きな違いは見られなかった。

図9の三角形パッドAの場合と図10の三角形パッドBの場合を比較すると、三角形パッドAの場合の方がプロフィールの形状がシャープであることがわかる。このことを比較して図11に

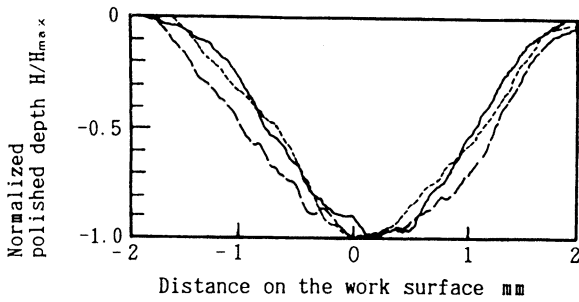


Fig. 11 Surface profiles polished with various shapes of pads: $t=20\text{min}$;
 — pad A, $\omega_1 = 60\text{rpm}$, $\omega_2=25\text{rpm}$, $P=0.6\text{N}$
 - - - pad B, $\omega_1 = 60\text{rpm}$, $\omega_2=25\text{rpm}$, $P=0.6\text{N}$
 ···· circular pad, $\omega_1=120\text{rpm}$, $\omega_2=50\text{rpm}$, $P=0.2\text{N}$

示す。パッドAの場合、周縁部の研磨量がピーク中央部のそれに比して相対的に少なく、ガウス曲線的な形状となっており、パッドBの場合に比較してシャープな形状をしている。図中に円形パッドのプロフィールも示してある。この場合にはパッドBの場合より、中央部ではシャープであるが周縁部ではブロードである。以上の結果はLAPにおいてはパッド形状が研磨面プロフィールに影響することを示しており、このことは除去対象とするうねりの大きさに応じて適切な形状のパッドを用いることによって、より微細なうねりの除去が可能となることを示唆している。

3.3 研磨面プロフィールの解析的検討

研磨量解析のために図12に示すような座標系を設定する。ワーク回転中心 O_2 を原点とし、パッド回転中心 O_1 をx軸上にとる。なお、ワーク回転のない場合の研磨領域は O_1 を中心とする半径 O_1N の円内の領域となる。

はじめに述べたように、研磨量の解析の要点は、研磨における加工量はPrestonの経験則に従うとし、これを求めることである。そこで、ワーク上の任意の点における研磨時間 t での研磨量 $H(x, y, t)$ は、パッドとワーク間の相対速度 $v(x, y, t)$ と研磨圧力 $P(x, y, t)$ との積に比例するとする。さらに、研磨圧力 $P(x, y, t)$ がパッドとワークとの接触面内で一様で、かつ、研磨時間にもよらないと仮定する。そうすると研磨量は次式で表される。

$$H(x, y, t) = K \int_0^t v(x, y, t) dt \quad (1)$$

ここで、 K は定数である。したがって、式(1)により相対速度 $v(x, y, t)$ を解析することによって任意の点の研磨量、すなわち研磨面のプロフィールをシミュレーション可能となる。

最初に、ワーク回転のない場合の点 $P(r, \theta)$ における研磨量を求める。図12の座標系において、パッドが回転中心 O_1 に関して1回転するとき、半径 r の円周上の点 $P(r, \phi)$ における有効研磨距離が円弧 QQ' に相当する領域 $(-\alpha \leq \theta \leq \alpha)$ となることを考慮すると、 P 点における研磨量 $h(r, \phi)$ は次式で表される。

$$h(r, \phi) = K \int_0^{2\pi/\omega_1} v(r, \phi, t) dt$$

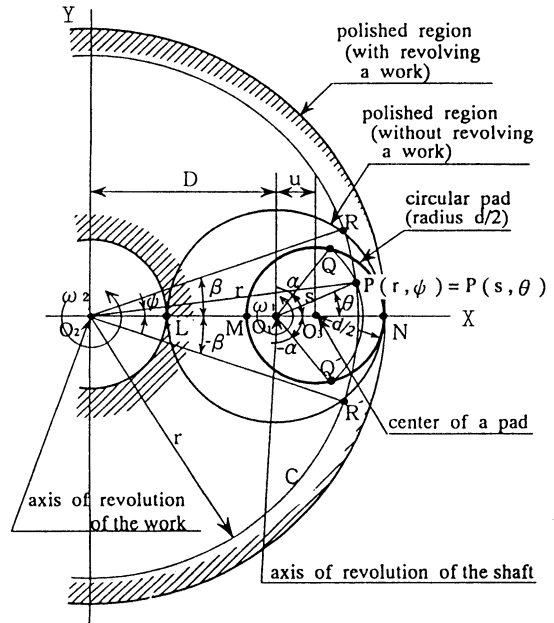


Fig. 12 Coordinate system for calculation of the polished depth

$$= (K/\omega_1) \int_{-\alpha}^{\alpha} v(r, \phi, \theta) d\theta \quad (2)$$

ここで、研磨時間 t ではポリシャの総回転数は $\omega_1 t / 2\pi$ であるので、これを式(2)に掛けることによってワーク回転のない場合の P 点での総研磨量 $H(r, \phi)$ が求まり、次式で表される。

$$H(r, \phi) = (Kt / 2\pi) \int_{-\alpha}^{\alpha} v(r, \phi, \theta) d\theta \quad (3)$$

つぎに、ワークも回転する場合について考える。パッドとワーク共に回転する場合には、ワーク上の任意の点の運動軌跡を解析的に求めて研磨量を求めることは容易ではない。しかし、研磨時間 t がパッドおよびワークの回転周期に対して充分長く、かつ、パッドの回転周期とワークのそれとが同期していなければ、最終的な研磨形状はワーク回転中心 O_2 に関して回転対称となり、 O_2 を中心とする任意半径 r の円周上の任意の点 $P(r, \phi)$ は一様に等しく研磨されると考えることができる。

いま、ワークが回転せずにパッドのみが回転するときには、ワーク上の半径 r の円周のうち研磨される部分は、円弧 RR' の部分 $(-\beta \leq \phi \leq \beta)$ である。そこで、円弧 RR' 上のすべての点についての総研磨量を算出し、これを図12に示す半径 r の円周上の各点に均等に配分して平均化したものをワーク回転時の研磨量と近似する。そうすると研磨量は次式で表される。

$$H(r, \phi) = (1/2\pi) \int_{-\beta}^{\beta} (Kt / 2\pi) \int_{-\alpha}^{\alpha} v(r, \phi, \theta) d\theta \cdot d\phi$$

$$= (Kt / \pi^2) \int_0^{\beta} \int_0^{\alpha} v(r, \phi, \theta) d\theta \cdot d\phi \quad (4)$$

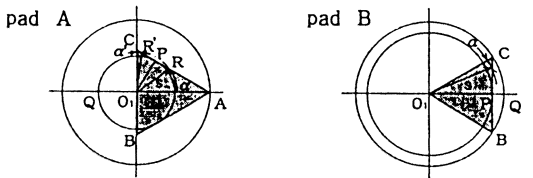


Fig. 13 Coordinate system for calculation of the polished depth

また、P点における相対速度 $v(r, \phi, \theta)$ は、接触点におけるパッドおよびワークの速度ベクトルをそれぞれ v_1, v_2 とすると次式で表される。

$$v(r, \phi, \theta) = \left| \vec{v}_1 + \vec{v}_2 \right|$$

$$= \{s^2 \omega_1^2 + r^2 \omega_2^2 - 2sr \omega_1 \omega_2 \cos(\theta - \phi)\}^{1/2} \quad (5)$$

式(4), (5)における α と β は円形パッドでは次のようになる。

$$\alpha = \begin{cases} \pi & (0 \leq s \leq 0_1M) \\ \cos^{-1} \frac{s^2 + u^2 - (d/2)^2}{2su} & (0_1M \leq s \leq 0_1N) \quad (6) \\ 0 & (0_1N \leq s) \end{cases}$$

$$s = (r^2 + D^2 - 2rD \cos \phi)^{1/2} \quad (7)$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{r^2 + D^2 - \{u + (d/2)\}^2}{2rD} \quad (0_2L \leq r \leq 0_2N) \quad (8)$$

三角形パッドの場合にも β については円形パッドの場合のそれと同様に式(8)によって与えられる。 α は図13に示す幾何学的関係を考慮して三角形パッドAの場合には次式のようになる。

$$\alpha = \begin{cases} \pi/2 & (0 \leq s \leq 0_1P) \\ \cos^{-1} \frac{s^2 + (0_1A)^2 - (AR)^2}{2su} - \cos^{-1} \frac{s^2 + (0_1A)^2 - (AR)^2}{2s(0_1A)} & (0_1P \leq s \leq 0_1C) \quad (9) \\ \cos^{-1} \frac{s^2 + (0_1A)^2 - (AR)^2}{2su} & (0_1C \leq s \leq 0_1A) \end{cases}$$

また、三角形パッドBの場合には次式のようになる。

$$\alpha = \begin{cases} \pi/6 & (0 \leq s \leq 0_1P) \\ \pi/6 - \cos^{-1}(0_1P/s) & (0_1P \leq s \leq 0_1Q) \quad (10) \\ 0 & (0_1Q \leq s) \end{cases}$$

上述の解析に基づいてシミュレートした研磨面のプロフィールを図14に示す。研磨速度条件は先の図11におけるものと同一であり、また、プロフィールの形状を比較するために最大研磨

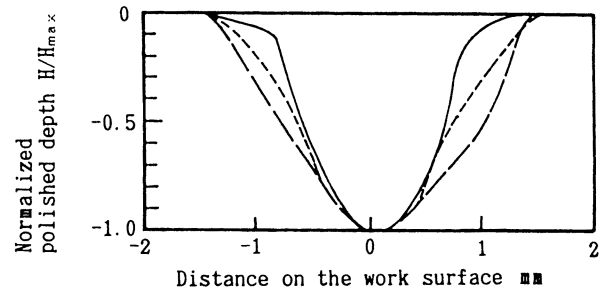


Fig. 14 Calculated surface profiles for various shapes of pads: ——— triangular pad A; - - - - - triangular pad B; - · - · - circular pad

量で規格化している。シミュレート結果を見ると、パッドAを用いた場合に、研磨領域の周縁部では中央部に比して研磨量が相対的に小さく、ガウス曲線の最もシャープな形状である。これに対し、パッドBを用いた場合にはプロフィールは最もブロードである。このようなパッド形状の影響は先に示した実験結果と定性的によく対応しており、上述の近似的解析によって研磨形状を容易に評価できると言える。したがって本解析法は修正研磨においても所要の研磨量を得るための研磨条件の決定に有効な手段となることを物語っている。しかし、実際の研磨面のプロフィールはシミュレーションしたプロフィールより全体的にブロードであり、パッドの幾何学的形状から予想されるよりも広い領域を研磨していることになる。この点についてはパッドの変形をも考慮してシミュレーションを改善することが必要であると考えられる。

4. おわりに

ナノメートルスケールでのうねりの除去を意図した修正研磨について実験、理論の両面から検討を行った。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) 研磨圧力として反発磁気力を利用した微細圧力制御研磨装置を開発した。
- (2) LAPにおける研磨量は研磨の時間、荷重、速度に比例しミリメートルオーダの領域において研磨深さを $\pm 25\text{nm}$ の精度で、また、粗さを 5nm 以下に制御できる。
- (3) 微細パッドの形状が研磨領域の形状に影響を及ぼす。
- (4) LAPにおける研磨形状評価のための簡便で有効なシミュレーションの方法を示した。

参考文献

- 1) T. G. Bifanof, T. A. Dow and R. O. Scattergood: Ductile-Regime Grinding; A New Technology for Machining Brittle Materials, Trans. ASME, Vol. 11 (1991) 184.
- 2) H. Suzuki, S. Kodera, H. Matsunaga and T. Kurobe: Magnetic Field-Assisted Polishing; Application to Curved Surface, Prec. Eng., Vol. 11 (1989) 197.
- 3) R. A. Jones and R. L. Plante: Large Aspheric Optics, SPIE Vol. 571 Large Optics Technology (1985) 84.
- 4) R. A. Wilson, D. W. Reicher and J. R. Mcneil: Surface Figuring Using Neutral Ion Beams, SPIE Vol. 966 Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics (1988) 74.
- 5) J. van Wingerden, H. J. Frankena and B. A. van der Zwan: Production and Measurement of Superpolished Surfaces, Opt. Eng., 31, 5, (1992) 1086.