

光学素子の研磨加工技術

品田 邦典

研削・切削・研磨に代表される除去加工の中で、研磨加工の除去メカニズムは研削・切削と異なっている。研磨の除去メカニズムは、主に、

- (1) Rayleigh が提唱した微小切削説
- (2) Beilby が提唱した流動説
- (3) Grebenshchikov が提唱した化学作用説

の 3 つが複雑に作用しているといわれている。しかしこの研磨メカニズムについては解明が試みられているものの詳細にはわかっていないのが現状である。そのため複雑な研磨メカニズムを基に話を進めるよりもここでは研磨パラメーターのうち研磨工具の大きさに着目し、比較的大きな研磨工具を用いる研磨加工方式と、比較的小さな研磨工具を用いる研磨加工方式に大別し、解説を行ってゆくことにする。

比較的大きな研磨工具を用いる研磨加工方式としては、まず代表的なものとして、主に平面や球面形状のレンズ、プリズム等の光学素子の量産加工に適用されているオスカー式研磨がある。また、レーザー干渉計用参照ミラー等に求められる、より高精度な平面に対して使われる遊星運動型のリングポリシャー¹⁾と呼ばれる研磨や研磨工具と光学素子を非接触な状態で研磨し、原子・分子オーダーで除去を進行させるフロートポリシング²⁾等の加工方式が開発されている。

一方、比較的小さな研磨工具を用いる研磨加工方式としては、1960 年代頃から米国を中心に、天体、軍需、航空の分野に使われる任意の形状をもつ光学素子を研磨するために開発され始めたスモールツール研磨がある。

Polishing technology of optics (1995 年 9 月 29 日受理)
Kuninori SHINADA (株)ニコン相模原製作所技術開発部第 5 開発課 (〒228 相模原市麻溝台 1-10-1)

スモールツール研磨は、前加工面の形状を均一に研磨する均等研磨技術として用いられるほか、光学素子面の形状測定データを基に、プレストンの仮説式³⁾を用いた任意の位置の誤差部の除去量を制御する修正研磨技術としても用いられている^{4,5)}。また、スモールツールと微細砥粒の化学作用を組み合わせて原子・分子オーダーで除去を進行させる EEM (elastic emission machining)⁶⁾が開発されている。

本稿では、前述した種々の研磨加工方式について最近の状況を主に述べるとともに現在試みられている新たな研磨加工方式についても概説したい。

1. 比較的大きな研磨工具を用いた研磨加工

古くからカメラや双眼鏡に使われているレンズ、プリズム等の光学素子は、最近ではビデオムービーレンズ、CD ピックアップレンズ、レーザープリンターに代表される AV 機器、OA 機器等の光学系としても用いられるようになってきた。これらの光学素子の量産加工には、機械 1 台で多数個の光学素子を一度に研磨できる利点がある比較的大きな研磨工具を用いた研磨加工方式が適用されている。

1.1 オスカーリ式研磨

図 1 にオスカーリ式研磨の概観を示す。研磨工具は、鋳鉄製の皿に数 mm の厚さでピッチを塗布し、必要に応じピッチ面を平らに成形したべた皿、網目状に成形した網目皿等を用いる。研磨液は、主に水に酸化セリウム (CeO_2) を懸濁した水スラリーを用いる。研磨機は、カンザシをもつ横振軸と回転軸の 2 軸から構成されている。カンザシ横振軸には、回転軸方向に力が付加（重りもしくはエアー圧）できる。研磨は、カンザシ横振軸に

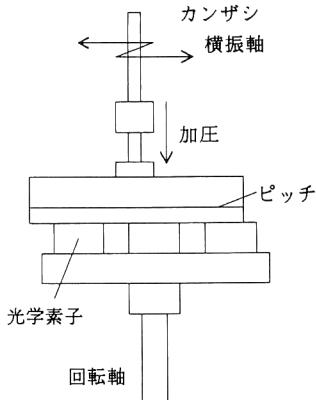


図1 オスカースタード研磨機の概観図。

研磨工具を取り付け、回転軸にレンズ、プリズム等の光学素子を取り付けた状態（もしくは逆の状態）で、研磨工具とレンズ、プリズム等の光学素子の間に研磨液を刷毛で塗り供給し、カンザシ横振軸をレンズ、プリズム等の光学素子に押圧し、両軸に相対運動を与えて行われる。オスカースタード研磨は、研磨機構成が簡単で高い運動精度を必要としない。ただし、ピッチの成形、横振軸と回転軸の位置や両者の回転数比等、長年の経験が必要で誰でもすぐにできるものではない。

最近、オスカースタード研磨で、従来以上の高精度な表面粗さを得る試みが行われている。砥粒に、ここでは酸化セリウムではなくべんがらを用い、研磨液の濃度を著しく薄くしてBK7ガラス基板を研磨した結果、表面粗さ $R_{\text{rms}} 0.4 \text{ nm}$ （表面粗さ計 WYKO TOPO）が得られたという報告がある⁷⁾。

1.2 リングポリシャー

リングポリシャーは、オスカースタード研磨と同様な砥粒、ポリシャーを用いている。ただし、研磨機の運動機構が遊星運動型であること、加工機の大型化が可能で大型の平面光学素子の研磨加工ができることがオスカースタード研磨とは異なるところである。図2にリングポリシャーの加工原理図を示す。回転軸に配置された平面板にピッチが成形されている。ピッチポリシャー面には光学素子a, b, cとピッチポリシャー面の修正用に工具dが配置される。修正用工具dは、研磨中にピッチポリシャー面の形状が変わらないように整形している。したがって、光学素子の平面を高い精度で仕上げることができる。この方式によれば光学素子の大きさにもよるが平面度 $\lambda/100$ ($\lambda=633 \text{ nm}$) 程度の加工も可能であると思われる。

レーザー測長用基準ミラー（長さ 300 mm で外形は棒

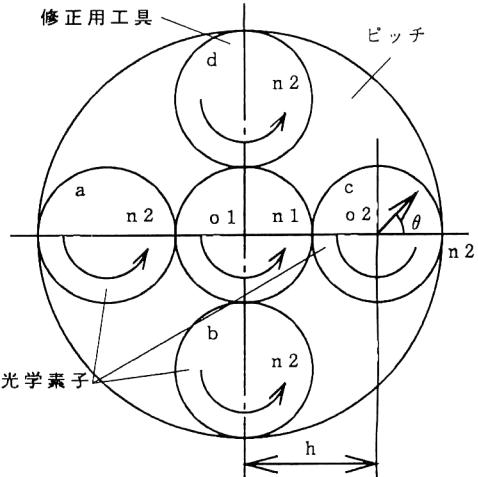


図2 リングポリシャーの加工原理図。

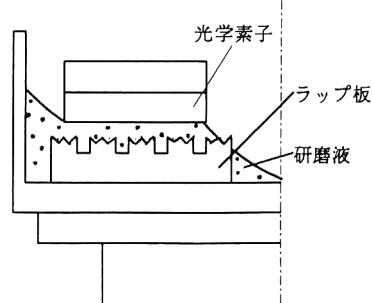


図3 フロートポリシングの原理図。

状）をリングポリシャーで研磨し、平面度が得にくい形であるものの $\lambda/20$ ($\lambda=633 \text{ nm}$) という高い平面度が得られたという報告がされている⁸⁾。

1.3 フロートポリシング

加工によって生じる加工変質層、コンタミネーションは、レンズ等の光学素子の透過率等をおとし、例えはレーザー光学系の光学性能に悪影響を及ぼすことがわかつてきた。

このような問題に対し、難波らは、フロートポリシングと呼ばれる超精密研磨加工法を開発した。図3にフロートポリシング装置の原理図を示す。この研磨は研磨工具の表面形状を光学素子表面に転写させるという考えに基づいている。このことから、高精度な研磨工具平面を得るために高精度な静圧油軸受を用いきわめて被削性のよい錫製の研磨工具（ラッピング板）表面を実機上で切削している。加工槽には酸化ケイ素 (SiO_2) 等の微細な砥粒を懸濁した水スラリーが入れられる。この状態で光学

素子をラップ板上に配置し、両者を高速回転させると、両者の間に介在する研磨液の動圧効果により非接触な状態になる。ラップ板と光学素子とのミクロの隙間で砥粒が光学素子表面に化学的に作用し、原子・分子オーダーの除去が進行する。この加工法による除去は加工物最表面に加わるエネルギーが小さいため加工変質層のない面を得られる。

このフロートポリシングは、加工変質層がなく、平面度、表面粗さ、端だれすべてに良好である必要性があるビデオ用磁気ヘッドのギャップ対向面の加工に導入されている⁹⁾。

2. 比較的小さな工具を用いる研磨加工

前述した比較的大きな研磨工具を用いる研磨加工は主に平面や球面の研磨に用いられている。しかし、非球面光学素子に対しては、研磨工具を光学素子表面に均一に当てることができないため加工が困難となる。

そこで、非球面光学素子の研磨加工にはスモールツール研磨のように比較的小さな研磨工具を光学素子表面上で走査して加工してゆく方式が適用されている。

2.1 スモールツール研磨

スモールツール研磨は、非球面光学素子の均等研磨にも用いられるが、部分的な除去量の制御が可能なため特に修正研磨で威力を発揮する。

修正研磨は、プレストンの仮説式に基づいて行われる。すなわち、光学素子表面上の任意の位置 X, Y における研磨除去量は、

$$H(x, y, T) = k \times P(x, y, T) \times V(x, y, T) \times dT$$

ただし、 k : 研磨定数、 $P(x, y, T)$: 研磨圧力、 $V(x, y, T)$: 相対速度、 dT : 滞留時間、と表されるので各パラメーターを制御することにより除去量を制御することができます。

例えば、研削や切削で形状を創成した後、3次元座標測定機やレーザー干渉計により形状を測定し、必要な形状に対する誤差を求める。この誤差とプレストンの仮説

式を用い研磨工具の軌跡、滞留時間分布を求め研磨加工を行うことにより形状の修正ができる。ただし、現状では測定機の測定誤差や研磨工具面の圧力分布の不均一性さらには研磨定数の変動等により1回で修正研磨は終わらず、測定と修正研磨を幾回か繰り返し目標形状を達成している。

この方式により上田らは、オンマシン計測非球面ポリシング装置を開発し超精密非球面の修正研磨を行っている。合成石英ガラス製の凸面非球面 ($\phi 43\text{ mm}$) を、計測と研磨を繰り返し行い、形状精度 $PV 0.072\text{ }\mu\text{m}$, $rms 16.2\text{ nm}$ を達成している。同様に凹非球面 ($\phi 130\text{ mm}$) に対しても修正研磨を適用し、良好な結果を得たという報告がされている¹⁰⁾。

また、安藤らは、短波長光用の非球面光学素子を高精度で研磨加工する超平滑研磨技術およびその装置(CSSP; Canon Super Smooth Polisher)を開発した。CSSPを用いて $\phi 500\text{ mm}$ の合成石英ガラストロイダルミラー、 $\phi 150\text{ mm}$ フッ化カルシウム非球面レンズ、 $240\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ CVD-SiC トロイダルミラーの修正加工をそれぞれ行い、すべてにおいて形状精度 $PV 0.08\text{ }\mu\text{m}$ 以下、表面粗さ $R_{rms} 0.2\text{ nm}$ 以下を達成したとの報告がなされている¹¹⁾。

ニコンにおいても非球面光学素子のひとつであるボルタ型X線光学素子¹²⁾の研磨にスモールツール研磨を試している。ボルタ型X線光学素子の管の内径は $\phi 5\sim 10\text{ mm}$ 程度の場合もある¹³⁾。このような形状の場合は内側を直接加工で非球面創成するのは困難であるため、レプリカによる方式を用いている。超硬材質の金型を母材に研削でまず非球面形状に創成し、形状精度を $PV 100\sim 200\text{ nm}$ に仕上げている。図4に結果を示す。次に、非球面創成した超硬金型をスモールツール研磨で均等研磨を行った。図5に金型研磨機の概観を示す。また、表1に研磨条件を示す。金型研磨後の形状精度を研削加工で得られた値と同程度のまま表面粗さのみを約 $R_{rms} 1\text{ nm}$ に仕上げた。図6に得られた表面粗さの結果

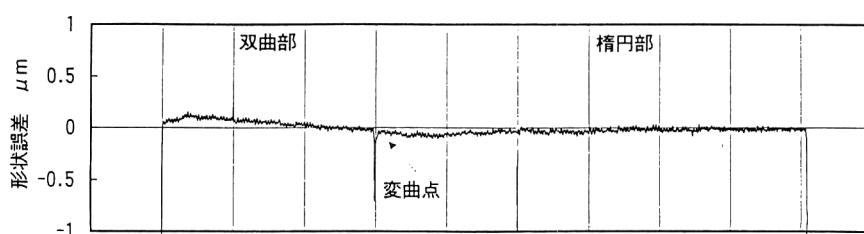


図4 金型研削後の形状精度。

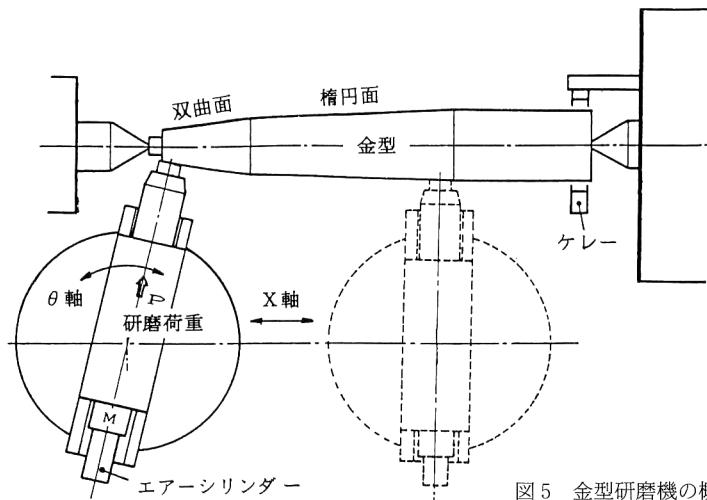


図5 金型研磨機の概観。

表1 金型の研磨条件。

項目	内 容
砥 粒	ダイヤモンド
研磨工具材質	銅, ピッチ
研磨工具寸法	$\phi 5 \sim 50$ mm
研磨工具回転数	20~100 rpm
金型回転数	10~50 rpm

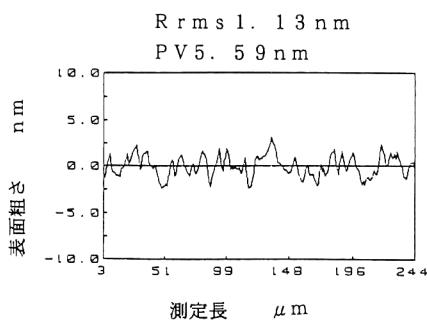


図6 金型研磨後の表面粗さ。

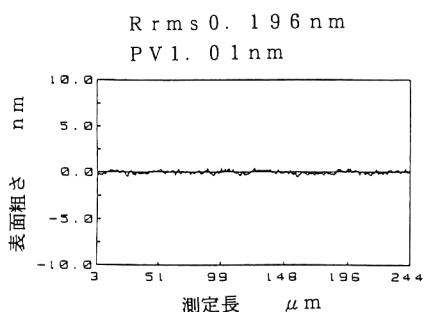


図7 内面研磨後の表面粗さ。

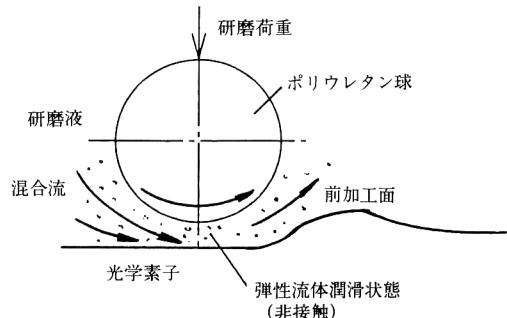


図8 EEM の加工原理。

を示す。この金型をベースにレプリカを行い、最後に内面研磨を行っている。内面研磨により表面粗さ R_{rms} 0.2 nm を得た。図7に表面粗さの結果を示す。この内面研磨においても形状を崩すことなく表面粗さだけを向上させた。

2.2 EEM

非球面光学素子にも形状精度や表面粗さが良好なだけでなく、加工変質層がないことが望まれる場合がある。

森らは、EEM と呼ばれる超精密研磨加工方法を開発した。図8にEEMの原理図を示す。EEMは、 $0.1 \mu\text{m}$ 以下の微細粉末粒子の懸濁液中で低弾性体であるポリウレタン球を回転させ、それを光学素子表面に近づけたときに生じる流体軸受的流れを用いて、研磨液中の微細粉末粒子を加工物表面の $\phi 1 \sim 2$ mm ほどの微小領域に作用させ除去を進行させる。このとき流体膜は荷重と流体の動圧との釣り合いにより一定に保たれ、非接触研磨を実現している。流体膜中では、ポリウレタン球の回転に

より微細砥粒が加工物表面に供給され微細粒子の固体表面の反応性を利用して化学的に研磨が行われる。したがって、微細粉末粒子が光学素子表面に作用するときに発生する加工物の応力場は弾性域であり、転位の発生、運動を促すような余分なエネルギーを与えることはない。EEM 法は流量が一定であることから単位時間当たりの作用粉末数を一定にすることができる、加工部での除去量はポリウレタン球の滞留時間に比例する。ポリウレタン球の送り速度を制御しながら加工域全域にわたって走査すれば任意の形状の研磨が可能となる。

この方法による非球面レンズ (BK 7 ガラス) の加工例が報告されている。球面あるいは平面を精度よく前加工しておき、わずかな非球面量だけを加工するという方法で、形状精度 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 以内が得られている¹⁴⁾。

3. 光学素子の研磨加工技術の新しい試み

ここでは、現代の多種多様化するニーズに対応をはかるべく新しい構想に基づき試みられている研磨加工のうち FFF (field-assisted fine finishing) 加工¹⁵⁾、磁気研磨加工¹⁶⁾、電気泳動現象を利用した工具を用いた研磨加工¹⁷⁾、P-MAC ポリシング (progressive mechanical and chemical polishing)¹⁸⁾について概説する。

FFF 加工とは、磁場や電場を援用した研磨加工法である。磁場援用には磁性流体や磁性砥粒などの機能性材料を活用した磁気研磨法がある。電場援用は帶電粒子の電気泳動現象を利用した研磨法である。磁気研磨法および電気泳動現象を利用した研磨法とも磁場や電場により遊離砥粒の運動を制御でき、したがって加工量を制御できる可能性がある研磨法である。

磁気研磨加工とは、粒状の磁性砥粒を磁場を用いて磁極に引きつけた固定砥粒を工具として用いる研磨法である。研磨能率は磁性砥粒径の増大とともに研磨圧力の増大により高くなる。磁場に、大型鉄粉と磁性砥粒を入れると鉄粉と磁性砥粒が同時に磁化され、磁性砥粒は鉄粉の表面に磁気吸着される。この状態の工具で研磨を行えば研磨圧力は鉄粉が補い、かつ加工物表面には微細な磁性砥粒のみが作用し効率よく良好な面が得られる。

電気泳動現象を利用した工具を用いた研磨加工とは、酸化物系の超微粒子がアルカリ溶液中で負に帯電することを利用し、電場中の陽極に引きつけられ吸着した固定砥粒を工具として用いる研磨法である。陽極部自体を工具として駆動し、加工する。また、電場内に超微粒子の他に高分子材料を結合剤として泳動させた場合、陽極に吸着した層が適度な結合力をもつので、乾燥し輪切りに

することによりペレット状の工具になる。この工具を用いた加工方式もある。

P-MAC ポリシングとは、光学素子と研磨工具の状態が直接接触状態から準接触状態へ、さらに非接触状態へと移行しながら光学素子表面を仕上げてゆく研磨法である。弾性体の研磨工具を用い、除去量が異なる 2 つの材料を組み合わせ、研磨工具上で中心にターゲットとする光学素子を配し、周辺に除去量の小さなダミーとなる材料を配して研磨を行う。そうすると弾性体の工具の変形と 2 つの材料の除去量の相違から上記状態が達成される。直接接触状態とは、オスカー式研磨のように光学素子表面と研磨工具が接触している状態のことである。準接触状態とは、例えば、シリコンのメカノケミカルポリシングのように光学素子表面と研磨工具の間に研磨液層と研磨工具の両者が作用する状態のことである。非接触状態とは、フロートポリシングや EEM のように光学素子表面と研磨工具が接触していない状態のことである。通常、研磨加工は直接接触状態、準接触状態、非接触状態の各々の一定状態で加工が進行する。P-MAC ポリシングは、接触と準接触を繰り返しながら光学素子表面の凸部を除去してゆき、その後非接触状態に移りさらに光学素子表面を平滑にすることが可能な研磨法である。

長い歴史をもつ研磨加工は、飛躍的に進歩してきたわけではなく着実に一步一歩進歩し続けてきたと思う。この研磨加工に関して、近年行われている光学素子の研磨加工技術を研磨工具の大きさに着目し、要望される用途や精度等に対応する研磨加工法や新たな試みがなされている新しい研磨加工法について幾つか概説した。

今後も多様化する光学素子の要望に応えるには、従来の研磨加工技術をさらに改良してゆくとともに、全く新しい原理に基づいた研磨加工技術の研究開発も必要不可欠である。歴史に埋もれることなく光学素子の研磨加工技術に今後も携わってゆく覚悟である。

文 献

- 1) F. Cooke, N. Brown and E. Prochnow: "Annular lapping of precision optical flatware," Opt. Eng., 15 (1976) 407-415.
- 2) 難波義治: "フロート・ポリシング", 光学, 13 (1984) 454-462.
- 3) F. W. Preston: "The theory and design of plate glass polishing machines," J. Soc. Glass Technol., 11 (1927) 214-256.
- 4) R. Aspden, R. McDonough and F. R. Nitchie, Jr.: "Computer assisted optical surfacing," Appl. Opt., 11 (1972) 2739-2747.
- 5) R. A. Jones and R. L. Plante: "Rapid fabrication of large

- aspheric optics," Proc. SPIE, **571** (1985) 84-91.
- 6) 森 勇蔵, 山内和人, 遠藤勝義: "Elastic emission machining," 精密工学会誌, **55** (1989) 46-50.
 - 7) 田中 勇, 荒井 彰: "通常光学研磨による超平滑平面研磨の試み", 東北大学科学計測研究所報告, **36** (1987) 83-87.
 - 8) 黒澤 洋: "光学平面の研磨加工に関するトラッキング効果", 光技術コンタクト, **33** (1995) 276-280.
 - 9) 難波義治: "フロート・ポリシング", 光技術コンタクト, **31** (1993) 679-685.
 - 10) 新宮克喜, 安平宣夫, 上田修治: "三次元曲面光学部品の超精密加工技術", Natl. Tech. Rep., **39** (1993) 26-32.
 - 11) 安藤 学, 根岸真人, 龍本雅文, 出口明信, 鳩崎忠弘, 中村宣夫, 鳴海廣治, 山本頤徳: "超平滑研磨技術の開発", 1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論集 (1994) pp. 709-710.
 - 12) V. H. Wolter: "Spiegelsysteme Streifenden Einfalls als abbildende Optiken fur Rontogenstrahlen," Ann. Phys., **10** (1952) 94-114.
 - 13) S. Aoki, T. Ogata, S. Sudo and T. Onuki: "Sub 100 nm-resolution grazing incidence soft X-ray microscope with a laser produced plasma source," Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) 3477-3480.
 - 14) 大谷和男, 奥山博信, 森 勇蔵, 松岡克典, 山崎恭弘: "EEMによる非球面レンズの加工", 精密工学会誌, **57** (1991) 85-90.
 - 15) 黒部利次: "FFF加工", 光技術コンタクト, **32** (1994) 115-120.
 - 16) 進村武男: "磁気研磨法によるファインセラミックスの仕上げ加工", 機械技術, **42** (1994) 25-30.
 - 17) 蔡 少歩, 谷 泰弘, 池野順一: "超微細砥粒の電気泳動現象を利用した研削法に関する研究", 1992年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (1992) pp. 199-200.
 - 18) 河西敏雄: "超精密研磨の必要性とそのアプローチの方", 光技術コンタクト, **31** (1993) 532-543.