構造制御形固定砥粒研磨パッドの開発*

(加工特性の向上に関する検討)

藤田 努^{*1}, 榎本 俊之^{*2}
富永 茂^{*3}, 鈴木 眞^{*3}

Development of a Structure-Controlled Fixed Abrasive Pad (Improvement of the Processing Properties)

Tsutomu FUJITA, Toshiyuki ENOMOTO^{*4},
Shigeru TOMINAGA and Makoto SUZUKI

^{*4} Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamada-oka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

Recently, there has been strong demand for replacing the loose-abrasive machining with fixed-abrasive polishing because of the large amount of the waste slurry. However, the conventional fixed-abrasive polishing has the problem such as low finishing efficiency. To overcome the problem, in the previous report, a structure-controlled fixed-abrasive pad which consists of a fixed-abrasive layer and an abrasive holding layer was introduced for finishing optical glass. And then the finishing efficiency of the developed pad was higher than that of the conventional pad, but on the other hand, the factors which effects on the finishing efficiency were not clear. So, this paper deals with the effects of the pad surface condition which was considered as one of the influential factors on the processing properties. As a result, the factors which effects on the finishing efficiency was clarified. In addition, high finishing efficiency was able to be achieved by optimizing the pad surface condition.

Key Words: Polishing, Lapping, Tool, Slurry-Free Finishing, Fixed-Abrasive Pad, Polishing Pad, Ceria Abrasive, Optical Glass

1. 結 言

近年、デジタルカメラ、携帯電話やパーソナルコンピュータなどの需要が急増し、光学レンズやハードディスクなど小型かつ高性能な精密部品が大量に製造されるようになった。一般にこれら精密部品の最終仕上げ工程では、良好な表面粗さを容易に得られる遊離砥粒研磨加工、すなわちスラリーを用いる研磨加工が行われることが多い。しかし大量に消費するスラリーによる加工コストの増加や廃液処理による環境負荷の増大などが大きな問題となっている。

このような問題を解決するために、遊離砥粒研磨加工を固定砥粒研磨加工へと置き換える試み⁽¹⁾が多方面でなされている。しかし遊離砥粒研磨加工と同等

の表面粗さを達成した場合でも、一般に加工能率が低く、ほとんど実用化されていないのが現状である。

そこで筆者らは、加工能率を高めるために砥粒供給と砥粒保持という異なる機能を担う2つの層が交互にスパイラル状に配置された固定砥粒研磨パッドを提案・開発⁽²⁾した。そして実際に光学ガラスを対象に純水のみで加工を行った結果、スラリーを用いる研磨加工と比べ、ふちだれが大きく改善され、より高い加工能率のもと良好な仕上げ面粗さを得ることができた。一方、コンディショニング条件により研磨パッドの表面状態は変化し、加工能率はその影響を強く受けることがわかったが、その具体的な要因については不明であり、さらなる加工能率の向上が困難な状況にあった。また開発したパッドを実用化するためには、安定な加工状態を再現性よく実現することが求められるが、やはり未検討であった。

そこで本報では、加工能率だけでなく、加工特性の再現性などを向上させることを目的に、パッド表面状態が加工特性に及ぼす影響について検討を行った。

* 原稿受付 2007年7月11日。

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)。

^{*2} 正員、大阪大学大学院工学研究科。

^{*3} (株)ロキテクノ(〒140-0013 東京都品川区南大井6-20-12)。

E-mail: enomoto@mech.eng.osaka-u.ac.jp

2. スパイラル構造を有する固定砥粒研磨パッド

本開発による固定砥粒研磨パッドはセリア砥粒(平均粒径 $0.2 \mu\text{m}$) を結合させた砥粒層を, アクリル系の熱可塑性樹脂からなる繊維シート(繊維層)によって挟み込み, このシートを螺旋状に巻き取りながらウレタン系の熱可塑性樹脂(樹脂層)で接着することで作製している。図1にパッド表面のSEM写真を示す。

次に開発したパッドの特徴について述べる。このパッドでは高い加工能率を得ることを目的として砥粒層では砥粒を高密度化(95 wt%) し, 結合剤樹脂によって砥粒表面が被覆されることを抑制している。しかし砥粒層は結合剤が極めて少ないため非常に脆く, パッド磨耗が激化するという課題が生じたため, 繊維層および樹脂層を設けることによって磨耗を抑えている。さらに繊維層および樹脂層では放出した砥粒を保持・滞留させる効果と工作物との摺動特性を高めるという効果を発現する。そしてこれらの効果によって, 遊離砥粒研磨加工と比較して砥粒消費量を $1/25$ に抑え, 加工能率を 20% 向上させることができた⁽²⁾。

ここでパッド表面状態はそれら加工特性に大きく影響を及ぼすが, そのパッド表面は繊維層から伸びてきた繊維と表面の凹凸が混在する複雑な状態になっている(図1)。このためパッド表面の状態を把握するためには, 一般的に行われるパッドの3次元プロファイルの測定だけではなく, 繊維長さの評価も必要とされる。

3. パッド表面状態が加工状態に及ぼす影響

3・1 加工再現性の評価 前報⁽²⁾の結果より, #170のダイヤモンドドレッサを用いて, in-situ ドレッシングを行いながら加工をした場合, パッド内から放出された砥粒濃度により加工能率が決まり, その再現性は高いことがわかっていた。一方で#60のダイヤモンドドレッサを用いた場合, より高い加工能率が得られたものの評価した実験回数が少なく再現性は未検討であった。そこで#170 ドレッサを用いた前報の実験と同様に水およびスラリーを供給して加工を行い, 砥粒濃度と加工能率を比較した。

実験にはLapmaster製の片面研磨機LP-15Fを使用し, $\Phi 420 \text{ mm}$, $t 3 \text{ mm}$ のスパイラル構造固定砥粒研磨パッド(放射状溝32本)を研磨定盤に設置した。そしてスエードパッドを用いて工作物を水貼りしたホルダとドレッサをパッド上に載せ, それぞれデッドウェイトによって圧力を調節した。さらにノズルから純水およびセリアスラリーを供給し, 工作物およびド

Fig. 1 SEM image of the developed pad surface

Fig. 2 Experimental set up of finishing process

Table 1 Finishing conditions

Workpiece	Optical glass BK7 75 mm - 75 mm - t 1 mm
Finishing pressure	10, 15 kPa
Rotation of workpiece	40 rpm
Rotation of pad	40 rpm
Dresser	#170, #60 diamond dresser
Dressing pressure	#170 2.6 kPa, #60 3.2 kPa
Rotation of dresser	50 rpm
Finishing time	10 min
Finishing fluid	• Pure water • Slurry with ceria abrasives
Supply rate	10 mL/min

レッサを回転させて加工を行った(図2)。また加工前には, 加工中と同じドレッサを用いてパッド表面のコンディショニングを30分間行った。加工条件を表1に示す。

砥粒濃度が加工能率に及ぼす影響を図3に示す。この結果から#60ドレッサを用いた場合においても, 加工能率は砥粒濃度と強い相関があり, 砥粒濃度が同等であれば得られる加工能率はほぼ一定で, その再現性は高いことがわかった。

ここで加工中の様子を詳細に観察したところ, #170ドレッサを用いた場合, 工作物とパッド間の摩擦摺動によって工作物の回転が不規則になり, テーブルの回

転にともなって周期的な振動が生じていた。そのため研磨中に工作物がホルダよりスリップアウトすることがあった。これはパッド硬度が原因であると考えられ、市販の研磨パッドと比べて本パッドは非常に硬いため、わずかな平坦度の悪化によりホルダ全体が上下に動き、スリップアウトが発生しやすい状態になっていた。一方、#60 ドレッサを用いた場合、一連の加工実験において、スリップアウトは全く生じなかった。

3・2 工作物スリップアウトの評価 前節から #60 ドレッサを用いることでスリップアウトが抑制されることを示唆する結果が得られた。そこで工作物・研磨パッド間に生じる摩擦力を測定することで、工作物のスリップアウトに強く影響を及ぼす衝撃的な力を評価することとした。

摩擦力測定方法は以下に述べるように実際の加工とほぼ同様の状態で行った。すなわち、工作物として用いているガラス板を試験片として用い、ホルダに取り付けた。そしてホルダ全体を2本のアームで支え、アームとの接点にロードセルを取り付け、試験片に加わる摩擦力を計測した。なお、試験片は加工とは異なり、無回転の状態とした。ここでパッド中心に近いセンサをCH1、遠いセンサをCH2とした(図4)。また測定は、加工時と同様にパッド表面のコンディショニングを30分間行ったあとで、摩擦力測定装置を設置し、10分間評価した。

次に使用するドレッサにより変化するパッド表面の状態を把握するために、コンディショニング後に繊維長さと3次元プロファイルの評価を行った。繊維長さに関しては日本電子製の走査型電子顕微鏡JSM-5800Aを用いて観察を行った。また小坂研究所製の3次元表面粗さ測定器SE3500K特を用いて、3次元プロファイルの評価した。

3・3 実験結果および考察 ドレッサによるコンディショニング後のパッド表面の繊維長さについて図5に、3次元プロファイルについて図6に示す。また摩擦力については、10分間の評価時間では立ち上がりの時間を除いて、ほぼ一定の値を示すことがわかった。そこで測定を始めて1分間後から研磨定盤がおよそ6回転する間にあたる8秒間の結果を図7に示す。

前報⁽²⁾では加工前および加工中に用いるドレッサを変更することによって、3次元プロファイルが変化することを明らかにしたが、図5からわかるように本開発パッドでは繊維長さも変化する。具体的には#170 ドレッサを用いたときに比べ、#60 ドレッサを用いることで繊維が長くなっているのがわかる。

Fig.3 Relationship between material removal rate and abrasive concentration in waste slurry (usage of #60 dresser)

Fig.4 Schematic of the friction force measuring equipment

(a) Usage of #170 dresser (b) Usage of #60 dresser
Fig. 5 SEM image of the pad surface

PV 41 μm, 3.4 μm Ra (a) Usage of #170 dresser
PV 67 μm, 5.8 μm Ra (b) Usage of #60 dresser
Fig. 6 3D profile of the pad surface

(a) Usage of #170 dresser (b) Usage of #60 dresser
Fig. 7 Friction force between the pad and the workpiece

また図 6 から、#170 ドレッサを用いるとパッドのスパイラル構造による凹凸が見られるが、#60 ドレッサを用いると等方性の面になることがわかった。次に図 7 の摩擦係数測定結果から平坦度の影響を受け、工作物に振動が発生していることが確認できた。ここで#170 ドレッサを用いた場合には工作物に作用する摩擦係数がテーブルの回転にともなって大きく変動するのに対して、#60 ドレッサを用いた場合は、その変動が抑えられていることがわかる。そのため工作物に作用する摩擦係数のピーク(最大摩擦係数)は#170 ドレッサとほとんど変わらないが、研磨定盤が 1 回転する間の摩擦係数の変動(摩擦係数変動幅)が 60% 程度に抑えられている。したがって衝撃的な力が緩和されることで、工作物のスリップアウトが生じなくなったと考えられる。

3・1 節で述べたように、摩擦係数変動はパッド平坦度の影響を強く受ける。そこで#170 と#60 の違いが平坦度を評価するために、パッド表面の高さを測定した(半径方向に等間隔 12 箇所、パッドの回転軸を中心に 90° ごとに行った)。その結果、平坦度は#170 が 28 μm 、#60 が 30 μm となりほとんど同じであることを確認した。したがって平坦度の違いではなくパッド表面状態の違いが工作物 - パッド間の摩擦係数変動に影響を与えたと考えられる。しかしドレッサを変更したことにより、パッド表面状態として繊維長さおよび 3 次元プロファイルが同時に変化してしまい、いずれが強く影響を与えるのかを特定することができなかった。

3・4 3 次元プロファイルの違いが加工状態に及ぼす影響 摩擦係数変動に影響を与える要因を明らかにするために、パッド表面の繊維長さをそろえることで、3 次元プロファイルのみが摩擦係数変動に及ぼす影響について検討した。具体的にはドレッサと研磨定盤の相対速度を高める(ドレッサ 50 rpm、研磨定盤 50 rpm)ことで繊維長さを短いと考えられる状態に揃え、3 次元プロファイルのみを変化させた。

こうして得られた研磨パッドの 3 次元プロファイルを図 8 に、摩擦係数測定結果を図 9 に示した。図 8 から、#170 ドレッサを用いるとパッドのスパイラル構造による凹凸が見られ、#60 ドレッサを用いると等方性の面になるという傾向が図 6 と同様に確認された。摩擦係数特性についても図 7 と同様、#170 と#60 ドレッサ使用時に明らかな差があり、#60 ドレッサを用いることで摩擦係数変動幅を 50% 程度に抑えることができた。また前節と同様に平坦度を評価したところ、#170 が 40 μm 、#60 が 36 μm となり大きな違い

Fig. 8 3D profile of the pad surface

Fig. 9 Friction force between the pad and the workpiece

Fig.10 Conceptual model of influence of dresser type on pad surface condition

は無いことを確認した。これらの結果から繊維長さが変わらない状態でも 3 次元プロファイルの違いにより摩擦係数変動が抑えられており、衝撃を緩和できていることがわかった。

この理由を明らかにするためにパッド表面の状態を詳細に観察すると、#170 ドレッサを用いてコンディショニングした場合、スパイラル構造の凹凸がみられ、山部分の繊維・樹脂層と谷部分の砥粒層がはっきりと分かれていた。そしてこの繊維・樹脂層はくずれにくい層であり、砥粒層は脆い層であるため、#170 ドレッサでコンディショニングしたパッド表面は衝撃を吸収しにくい状態であると考えられる。一方、#60 ドレッサを用いてコンディショニングした場合、砥粒層と繊維・樹脂層がほぼ均等に上部にあらわれており、#170 ドレッサによるパッド表面と比較すると衝撃を吸収しやすい状態になったと考えた(図 10)。そこで、

このパッド表層の変形特性を調べるために、実際にマイクロゴム硬度計（高分子計器製 MD-1、先端直径 0.16 mm）を用いてパッド表面の 10 点を測定した。#170 ドレッサでコンディショニング後のパッド表面を測定した結果、測定 10 点中の 5 点に関して測定限界値の 100 を超え、平均値も 100 以上となった。一方、#60 ドレッサを用いたパッド表面のマイクロゴム硬度はすべて 100 以下となり、平均値は 97 を示した。

これらの結果から、#170 ドレッサでコンディショニングしたパッド表面はスパイラル状に強固な層があるため摩擦係数変動が大きくなったと考えられる。一方、#60 ドレッサによるパッド表面は脆いため、接触した部分がくずれることで衝撃的な力を緩和できたと考えられる。

4. パッド表面状態が加工能率に及ぼす影響

4・1 砥粒保持特性に関する検討 次に、より高い加工能率を得ることを目的としてパッド表面状態が加工能率に及ぼす影響について検討した。加工能率に影響を与える要因の一つとして、パッド表面上に滞留する砥粒量が挙げられる。また固定砥粒研磨パッドにおいては、パッド内からの砥粒放出量を増大させることなく、パッド上での砥粒量を増やすことが求められ、そのためパッド表面の砥粒保持特性を向上させることが重要である。そこでパッド表面状態の違いが砥粒保持特性に与える影響について検討した。

砥粒保持特性は以下のように評価した。まず加工中にパッド表面上から流れ落ちる廃液を回収した (b)。そして加工終了後にパッド表面に残っている砥粒を 500 mL の純水で洗い流し (a)、同様に回収した。それぞれ回収した廃液から砥粒濃度を測定し、(a) と (b) から加工中にパッドから放出される全砥粒量 (B) を、(a) から加工後にパッド上に滞留していた砥粒量 (A) を求めた。

その結果、砥粒保持特性を比較した場合、#170 および #60 ドレッサを用いてコンディショニングしたパッド表面において、大きな差がないことがわかった (表 2)。しかし前章で述べたようにパッド表面の 3 次元プロファイルには明確な違いがあったために、3 次元プロファイルは砥粒保持特性に影響を与えないことがわかった。

4・2 摺動特性の違いが加工能率に及ぼす影響 セリア砥粒によるガラスの研磨においてはガラス表面に生成される水和軟質層が摺動により削られて加工が進行すると考えられている。そこで工作物-パッド間の摩擦摺動特性に着目し、特に摩擦係数に応じて除

Table 2 Comparison of the weight of the abrasive on the pad surface

Type of dresser	#170	#60	#55
Abrasive weight on the pad after finishing (A)	30 mg	28 mg	45 mg
Total weight of the abrasive (B)	75 mg	72 mg	75 mg
Proportion of (A) in (B)	40 %	39 %	60 %

Table 3 Effect of the friction force between the pad and the workpiece on removal rate

Type of dresser	#170	#60	#55
Friction force N	45 (84)	53 (100)	49 (92)
Removal rate $\mu\text{m}/\text{min}$	0.15 (85)	0.18 (100)	0.19 (106)

The value in parenthesis indicates the relative value when setting #60 is assumed to be 100 of the standards.

去量が大きくなると考え、加工中の平均摩擦係数（全摩擦係数/評価時間）を評価した。その方法としては、前章の摩擦摺動特性を評価した実験において、測定した摩擦係数を評価時間 10 分間にわたって積分し、さらに評価時間で除算することで平均の摩擦係数を算出した。そして、この平均摩擦係数を用いて加工能率と比較を行った (表 3)。この結果から、加工能率と同様に平均摩擦係数が高くなっていることがわかった。

5. 加工特性の向上に関する検討

3, 4 章の結果から、パッドの表面状態によって加工特性が大きく変化することがわかったが、次にその向上を目的として、工作物に発生する振動の抑制についてさらなる改善を試みた。そして 3 章において、平坦度のくずれに起因する工作物の振動を緩和するためにはパッド表層の脆い部分を拡大することが有効とわかった。その方法として #60 ドレッサを用いて、パッド表面のプロファイルを変更したが、本章では切れ味の良いドレッサに変更し、ドレッサの押し付け圧力を抑えてコンディショニングする方法を試みた。すなわち粒度 #55 のダイヤモンドドレッサとし、その砥粒配列を変えることで切れ味を向上させた。実際にコンディショニングを行うと #60 ドレッサの 1/3 程度の押し付け圧力 (1.1 kPa) で同程度の砥粒が放出されることが確認できた (表 2)。また 3 次元プロファイルから、#60 ドレッサと同様に等方性の表面になり、表面粗さパラメータについては 120% 程度に拡大した (図 11)。

以上のパッド表層の軟質化の効果を確認するために、3・4 節と同様に摩擦変動を評価する実験を行った(図12)。同図からわかるように、#170 および #60 ドレッサを用いた場合に対し、ほとんど変動が無く、#170 ドレッサと比較すると約 10%、#60 ドレッサと比較すると約 30%に抑えられてことがわかった。そして #55 の平坦度は $38\text{ }\mu\text{m}$ だったため、#60 と #55 を比較して、表面粗さパラメータについては 20%の違い、平坦度については 5%の違いになっていた。これらの違いに対し摩擦力変動幅は 70%もの違いが表れたため、パッド表層軟質化の効果が得られたものと推察できる。

次に加工能率に大きな影響を与えることがわかった平均摩擦力について検討するために、4 章と同様に摩擦力測定と加工実験を行った(表3)。平均摩擦力を比較すると #170 ドレッサよりも大きな値を示すものの、#60 ドレッサより若干低い値を示すことがわかった。一方、加工能率については #170 ドレッサ使用時よりも高く、#60 ドレッサを用いた場合と同程度の加工能率が得られた。このように平均摩擦力が加工能率に大きな影響を及ぼすという 4 章の結果と対応しないものになった。

そこで加工能率に影響を与えると考えられる砥粒保持特性について評価する実験を行った。その結果、#55 ドレッサを用いたパッド表面では他のドレッサに比べ砥粒保持特性が大きく向上していることがわかった(表2)。しかし 4 章の結果からパッド表面の 3 次元プロファイルが砥粒保持特性に影響を与えないことがわかっていて、この原因に関しては詳細は不明ではあるが、工作物に発生する振動が抑えられたこととともない最大摩擦力が大きく低減したため、工作物が砥粒をパッド外に押し出す力が小さくなり、砥粒保持特性が向上したと推測できる。

以上の結果から、#60 ドレッサと比較して #55 ドレッサを用いたパッド表面では平均摩擦力が減少しているが、砥粒保持特性が向上したために同等の加工能率が得られたと考えられる。

今後は、これまで詳細に検討してこなかったパッド表面の繊維状態に着目し、それを制御することで平均摩擦力や砥粒保持特性を高め、さらなる加工特性の向上をはかっていく。

6. 結 言

砥粒層と繊維・樹脂層からなる構造制御形固定砥粒研磨パッドにおいて、その加工特性を高めることを

PV $59\text{ }\mu\text{m}$, $6.2\text{ }\mu\text{m Ra}$

Fig. 11 3D profile of the pad surface (usage of #55 dresser)

Fig. 12 Friction between the pad and the workpiece (usage of #55 dresser)

目的に、パッド表面状態が及ぼす影響について検討を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 加工特性としてスリッパウトの原因となる衝撃的な力の発生を評価し、パッド表層のプロファイルを変えることで安定した加工状態を達成することができた。
- 2) 低いドレス圧力 (1.1 kPa) で砥粒放出量が高くなる #55 ドレッサを用いることで、パッド表面の砥粒保持特性を高め、加工能率が向上し、さらに衝撃的な力の発生を抑制できた。

本研究の一部は財団法人 日本板硝子材料工学助成会の助成を受けて行われたことを記し、ここに深謝申し上げます。また本研究の遂行にあたりご協力を賜りました株式会社クリスタル光学ならびにリコー光学株式会社に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) Sato, M. et al., Polishing of ILD and STI by the LHA Pad, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.72, No.1(2006), pp.79-83.(in Japanese)
- (2) Enomoto, T. et al., Development of the Structure-Controlled Fixed-abrasive Pad (Application to Finishing of an Optical Glass), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.73, No.726 (2007), pp.277-282.(in Japanese)
- (3) Oliver, M.R. et al., CMP pad surface roughness and CMP removal rate, *Chemical Mechanical Planarization IV*, Vol.2000-26 (2001), pp.77-83.
- (4) Kim, H. et al., Pad Surface Roughness Effect on Material Removal Characteristics in Chemical Mechanical Polishing, *Proceedings of Autumn Conference of the Japan Society for Precision Engineering*, (2005), pp.329-330.(in Japanese)