研磨パッドの表面状態に着目した高能率研磨加工に関する研究*

内藤達也^{*1}, 佐藤基起^{*2}, 佐竹うらら^{*1}, 廣瀬研二^{*1}, 榎本俊之^{*3}

Improvement of Finishing Efficiency Considering Contact Behavior of Polishing Pad with Workpiece Surface

Tatsuya NAITO^{*1}, Motoki SATO, Urara SATAKE, Kenji HIROSE and Toshiyuki ENOMOTO

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

Recently, the achievement of further high-efficiency and high-quality polishing of glass disks as substrates of hard disk drives has been strongly required for reducing the production cost, increasing the storage capacity and downsizing the drive. In order to meet the requirements, it is very important to clarify and improve the polishing properties of suede polishing pads widely used in polishing glass disks and however, a very few researches concerning the pads have been conducted. Thus to overcome the problem, we performed the polishing experiments for glass disks in actual and found that the surface structure of the suede pads is key factor for improving the polishing efficiency. Based on the findings, we proposed a new polishing method that the polishing pad / workpiece contact zone is made intermittent and abrasives are uniformly supplied on the contact zone. As a result, it was found that high-efficiency and high-quality finishing were achieved by the method, as compared with the conventional polishing method.

Key Words : Polishing, Tool, Abrasive Grain, Polishing Pad, Suede Polishing Pad, Glass Disk, Finishing Efficiency

1. 緒 言

近年、大容量記憶装置の一つであるハードディスクドライブ (HDD) のさらなる需要の拡大にともない、HDD に搭載される磁気ディスクに対して、大容量化・小型化・低価格化の要求が一層強まっている。これらの要求に応えるために、磁気ディスク製造における重要な工程であるディスク基板の研磨加工に対しては、高品位化とともに低価格化を実現するための高能率化への要求が急激に高まっている。

一般に、磁気ディスク基板の研磨加工は、両面研磨機を用い、その上下の定盤に貼付された研磨パッド上に研磨剤スラリーを供給して行われるが、その研磨パッドの表面状態によって加工特性が大きく変わることが知られている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、磁気ディスク基板の最終仕上げ研磨加工において用いられるスエード研磨パッドの加工特性については、その重要性が高いにもかかわらず従来研究例が少なく、いまだ多くの不明な点がある。またその従来研究においても、加工能率に影響を及ぼす研磨パッド特性としてポリシャ表面にある空孔の径の大きさ⁽³⁾や空孔内における砥粒の目づまり⁽⁴⁾などが挙げられてはいるが、それだけでは加工ワークの枚数による加工特性の差などを説明することができず、上記の高能率化の要求に応えることは極めて困難である。

そこで本研究では、加工能率の向上を目的に、スエード研磨パッドの表面状態に着目した研磨加工モデルを提案し、そしてそのモデルにもとづいた最適な研磨パッド構造および加工方式について検討した。その結果、加工能率および工作物エッジ部の平坦性を向上することができたので報告する。

* 原稿受付 2011 年 6 月 20 日

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

^{*2} 大阪大学大学院工学研究科

^{*3} 正員, 大阪大学大学院工学研究科

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

2. スエード研磨パッドの表面状態に着目した加工モデルの提案

2.1 スエード研磨パッドによるガラスディスクの加工特性

スエード研磨パッドは、ナップ層とナップ層を支持する PET 基材より構成される。ナップ層はポリウレタンの湿式成膜法により製造された素材フィルムを用い、数十～数百 μm の大きな空孔を有し、その周囲に薄い壁状の膜、いわゆる構成柱を形成している⁽⁹⁾ (図 1)。この研磨パッドを用いて研磨加工を継続して行くと、空孔に砥粒が堆積し目づまりを起こすことで研磨パッド-工作物間に砥粒が供給されなくなり、加工能率が著しく低下してしまう⁽²⁾。実際の加工現場では、この目づまりを解消・抑制するためにドレスと呼ばれる研磨パッド表面をダイヤモンドドレッサでコンディショニングする作業を定期的に行っている。しかし研磨パッド・ドレスを定期的に行っても、加工を繰り返すと加工能率が徐々に低下してしまうといった問題が加工現場では指摘されている。そこで、こうした従来知見を確認するために、スエード研磨パッドを用いた加工実験を行い、加工能率に着目した加工特性を実際に評価することとした。

加工実験には両面研磨機よりも構成要素が少なく、加工能率に影響を与える研磨パッドの特性を特定しやすい、片面研磨機 (ENGIS 社製, HYPREZ 15) を使用した (図 2)。おもな加工条件を表 1 に示す。ここで 1 枚加工 (1 piece) とは図 2 中のワークホルダの中心に 1 枚のみディスクをチャックして行う加工であり、3 枚加工 (3 pieces) とはワークホルダの中心から等半径距離に 3 枚のディスクを 120 度間隔でチャックして行う加工である。使用したガラス基板は、2.5 インチのアルミノシリケート系アモルファス非強化ガラスである。そして、スエード系バックキングフィルムを用いて工作物をワークホルダに水貼りし、デッドウェイトによって加工圧力を調節した。研磨剤にはガラスディスクの最終仕上げ加工で多用されるコロイダルシリカ (平均粒径 20 nm) を用いた。実験では

Fig. 1 SEM image of suede pad

Fig. 2 Apparatus of single-sided polishing machine

研磨パッドの表面状態を一定にさせるために、加工条件を変更するごとにダイヤモンドドレッサ（粒度#55）で10分間のコンディショニングを行い、そして10分間の予備研磨加工を行った後、新しいディスク基板に対して20分間の加工を2回行った。加工能率は実験前後の重量の変化と工作物比重より算出した。

ここで、研磨加工の進行にともない、研磨パッドは工作物やダイヤモンドドレッサと擦れることにより摩耗が進む。そこで、長期間使用した研磨パッドの状態を再現するために、ダイヤモンドドレッサ（粒度#55）を長時間摺動させることで、大きく摩耗した研磨パッドを作製した。摩耗後の研磨パッドの厚さは、研磨パッドの中心部分を加工もドレスも行わない部分として残し、研磨装置に付属している定盤フェイシング装置に固定したダイヤルゲージを研磨パッド径方向に移動させながら、研磨パッド中心部分との高低差から求めた。

その結果、1枚加工においてはドレスを定期的に行った場合でも、研磨パッドの摩耗量が大きくなり研磨パッド厚みが小さくなるにつれて加工能率は低下すること（図3）がわかった。そして、加工枚数が3枚の場合は1枚の場合とは異なり、研磨パッドの摩耗量が大きくなると加工能率は逆に高まることもわかった（図3）。

この加工枚数により加工特性が異なる結果について、研磨パッド上でのドレッサ、工作物の動きと研磨パッド表面状態に着目して考察する。加工枚数が異なると、研磨パッド上での工作物の軌道が異なる。つまり1枚加工では研磨パッドに対して工作物は一方向に摺動するが、3枚加工では多方向に摺動する（図4）。こうした摺動軌

Table 1 Polishing conditions

Workpiece	Glass disk substrate 2.5" – 1 piece / 3 pieces
Size of work holder	1 piece: $\phi 137$ ($\phi 65.3 \times 1H$) 3 pieces: $\phi 165$ ($\phi 65.3 \times 3H$)
Polishing pad - Diameter of pad	Suede type pad 420 mm
Slurry - Concentration - Supply rate	Colloidal silica 16 wt% 1 piece: 10 mL/min, 3 pieces: 20 mL/min
Polishing pressure	1 piece: 11 kPa, 3 pieces: 14 kPa
Rotation of pad	40 rpm
Rotation of workpiece	40 rpm
Dresser	#55 Diamond

Fig. 3 Material removal rate with thickness of pad

跡が研磨パッドの表面状態に大きく影響を及ぼしたと考えられ、そこで走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope, SEM）を用いて加工前の新品の状態の研磨パッドとドレスにより摩耗させた研磨パッドの断面を観察した（図 5）。その結果、加工前の研磨パッド(a)に対し、摩耗した状態の研磨パッド(b)では上層部が削り落とされているとともに、表面構造、すなわちナップ層がドレスサ摺動方向に大きく倒れていることがわかった。そこでこうした研磨パッド表面状態が研磨作用に支配的であると考へ、次に研磨加工モデルを検討することとした。

2・2 研磨パッド表面状態に着目した加工モデル

本研究における研磨加工では、砥粒にセリアに比べて化学的作用が少ないと言われているコロイダルシリカを用いてガラスディスクを加工しているため化学的除去作用の影響が極めて小さく、研磨パッド上に供給され、支持された砥粒による機械的除去作用によりおもに加工が進行する。そこで加工能率は、実際に除去作用を行う砥粒の数（作用砥粒数）と個々の砥粒における除去量（砥粒単体除去量）の積によって表すことができる⁽³⁾。ここで研磨パッド表面と工作物とが接触せずに、砥粒のみが工作物と接触する場合、砥粒単体除去量は砥粒単体に作用する圧力に比例し、そして、砥粒単体に作用する圧力は、荷重が工作物と研磨パッドが支持する砥粒（作用砥粒）との接触部分にのみ作用するため、荷重を作用砥粒数で除した値となる。そのため、作用砥粒数と砥粒単体除去量は反比例し、作用砥粒数を増大させても砥粒単体除去量が低下するため、加工能率としてはほとんど変化しない。しかし、スエード研磨パッドのような軟質な研磨パッドにおいては、砥粒のみならず研磨パッド表面も工作物と接触し、荷重を分担する。このように、スエード研磨パッドでは工作物と接触する構成柱の表面全体で工作物を支持するため、砥粒が構成柱-工作物間に供給された場合、構成柱に作用していた圧力がそのまま砥粒に作用し、砥粒単体に作用する圧力は作用砥粒数に関係なく一定であり、作用砥粒数が変化しても砥粒単体除去量は一定となる。すなわち、加工能率は作用砥粒数に比例する⁽⁴⁾

Fig. 4 Workpiece motion relative to polishing pad

Fig. 5 SEM images of the suede pads (cross-section, 1 piece polishing)

次に、その作用砥粒数について考察する。作用砥粒数は研磨パッド-工作物間の接触状態によって大きく変化する。図 6 に加工前および摩耗した状態の研磨パッド表面の SEM 像を示す。図 5 (b)、図 6 (b)からわかるように、摩耗した研磨パッドの表面は構造が大きく倒れており、このことから図 7 (b)のように研磨パッドと工作物が隙間なく接触している部分（以下、連続接触部分と記す）が広がり、その連続接触部分の奥まで砥粒が入り込むことができなくなったと考えられる。そのため、加工前の新品状態の研磨パッド（図 6 (a)）のように連続接触部分が小さい場合（図 7 (a)）に比べ、作用砥粒数が少なくなり、その結果、加工能率は図 3（1 枚加工）に示したように低下したと考えられる。

3 枚加工の場合、工作物は研磨パッドに対して様々な方向で摺動するため（図 4）、一定の方向で摺動する 1 枚加工に比べて表面構造の倒れが小さいまま加工を行うことができると考えられる。図 8 に 1 枚加工・3 枚加工を

Fig. 6 SEM images of the suede pads (surface)

Fig. 7 Polishing model considering contact behavior of polishing pad with workpiece surface

Fig. 8 SEM images of the suede pads

行った後の研磨パッド断面を観察した結果を示す。研磨パッド表層が1枚加工の場合は同じ方向に倒れているのに対して、3枚加工の場合は様々な方向に倒れているのがわかる。そのため、図3に示したように、1枚加工に比べて高い加工能率が得られたと考察される。さらに、3枚加工においては研磨パッドの摩耗量が大きいほど加工能率が向上した。この理由については以下のように考えられる。スエード研磨パッドにおいて、表層の開孔径が大きいほど砥粒の目づまりが抑制され加工能率が向上することが報告されている⁽⁴⁾。スエード研磨パッドは上層部では比較的小さな空孔だが、下層部に行くほど空孔が大きくなるという表面構造を有するため、摩耗により研磨パッド表層の開孔径が大きくなるため、摩耗が進行すると目づまりが抑制されて加工能率は向上すると考えられる。しかし1枚加工の場合は表面構造に倒れが生じているため、目づまりは抑制されず、また連続接触部分が拡大することもあり加工能率は減少する。このように、摩耗による研磨パッド表層の開孔径の拡大が一因と考えられるが、今後のさらなる検討が必要である。

3. 高能率研磨を実現する研磨パッド構造および新加工方式の提案

前章の結果から研磨パッド-工作物間の接触部分を断続的にすることで、すなわちスエード研磨パッドの表面構造（ナップ層）を起こすことで、加工能率の低下を抑制できることが推測された。そこで、表面構造の倒れが生じないように、素材フィルム表面をサンドペーパーで一定量研削（以下、バフ加工と記す）した研磨パッドを新たに作製した。また、摩耗した研磨パッドを用い、倒れている表面構造を起こす方向に工作物を摺動させる研磨加工（逆回転加工）を行った。

3.1 バフ加工研磨パッドによる加工特性

前述のように、加工能率低下の要因となる研磨パッド表面構造の倒れは、加工時に工作物やダイヤモンドドレッサと研磨パッド表面が擦れることによって生じる。そこで、ダイヤモンドドレッサを用いたコンディショニングよりも切れ味に優れるバフ加工を用いて、ドレス摩耗による研磨パッドと同程度の厚さまで均一にパッドを加

Fig. 9 3D profiles of the polishing pad surfaces

Fig. 10 SEM images of the polishing pad surfaces (cross-section)

工し、研磨パッド表面構造に倒れが生じない研磨パッドを作製することで、加工能率の向上を試みた。

ドレスにより摩耗させた研磨パッドとバフ加工で厚みを減少させた研磨パッドの表面状態について、小坂研究所製の触針式 2-3 次元表面粗さ測定機 SE3500K による 3 次元的な凹凸 (3 次元プロファイル) を図 9 に、SEM による観察画像を図 10 に示す。ドレスで摩耗させた研磨パッド (図 9 (a), 図 10 (a)) と比較して、バフ加工した研磨パッド (図 9 (b), 図 10 (b)) は表面構造の倒れが小さいことが確認された。そして図 11 に示すように、研磨パッドの厚さが同程度である場合、バフ加工した研磨パッドの方 (buff) がドレスにより摩耗させた研磨パッドに比べて、加工能率が大きく向上した。加工前の新品の研磨パッド使用時よりも加工能率が向上したのは、複数枚工作物の同時加工の場合と同様、バフ加工をすることで表面構造に倒れが生じることなく研磨パッドの開孔径が大きくなり、砥粒の目づまりが抑制されたためと考えられる。

次にバフ加工した研磨パッドによる加工後の工作物エッジ部の平坦性について評価を行った。工作物エッジ部の平坦性の評価は、小坂研究所製の触針式 2-3 次元表面粗さ測定機を用いてエッジ部形状を測定し、加工前後の ROA (Roll-Off Amount) の変化量を加工による工作物除去厚さで除した値を指標とした。ここで ROA とは、測定した工作物表面形状のエッジから 5 mm - 10 mm の範囲における近似直線を求め、その直線とエッジから 1 mm の位置での形状の差を求めた値である。ROA がプラスで大きいほど、エッジだれが大きいことを意味する。また、本研究で実験に使用したガラス磁気ディスク基板の初期形状には若干ばらつきがあり、ROA のみで評価を行った場合、初期形状の影響が大きくなってしまいうため、加工前後の ROA の変化量を加工による工作物除去厚さで除し

Fig. 11 Material removal rate with thickness of pad

Fig. 12 ROA/removal amount with thickness of pad

Fig. 13 Pad deformation

Fig. 14 Depth of wear with distance from the center of the workpiece (dress)

た値を指標とした。図 12 からわかるように、バフ加工した研磨パッドによる加工後の工作物ではエッジ部の平坦性が大きく向上した。従来、研磨パッドの硬さや圧縮弾性係数がエッジ形状に影響を与える要因として考えられているが、それら进行评估するため 30 mm - 40 mm - t 20 mm のアルミ合金製の圧子をパッドに押し付け、圧力を 0 ~ 20 kPa の範囲で変化させてダイヤルゲージで変形量を測定した結果、研磨パッドの摩耗方法の違いによる研磨パッド変形量の差は見られなかった (図 13)。この理由については以下のように考えられる。研磨パッドをドレスにより摩耗させた場合、研磨パッド上の位置によって摺動速度が異なり、研磨パッド径方向に偏摩耗が生じてしまった (図 14)。そのため、工作物エッジ部に研磨パッドが強く接触し、エッジだれが生じたと考えられる。一方、バフ加工した場合は、研磨パッド全体を均一に加工できるため研磨パッドに偏摩耗が生じず、工作物エッジ部の平坦性の劣化が抑制されたと考えられる。

3.2 定盤逆回転を利用した加工方式

次に、定盤の逆回転を利用した新しい加工方式 (逆回転加工) を提案する。従来の研磨加工では研磨定盤は一方方向にだけ回転させて加工を行っているため、研磨パッドの表層の倒れが促進される。そこで、摩耗して表層が倒れた研磨パッドに対して倒れた表層を掘り起こす方向、すなわち定盤を逆方向に回転させることにより加工能力を向上できると考えた。

実際に、定盤を逆回転させて加工 (工作物 1 枚加工) を行った。通常回転方向での加工後と逆回転加工後の研磨パッドの 3 次元プロファイルを図 15, SEM による観察画像を図 16 に示す。通常回転加工後の研磨パッド (図 15 (a), 図 16 (a)) と比較して、逆回転加工後の研磨パッド (図 15 (b), 図 16 (b)) は表層の倒れた部分が掘り起こされていることがわかる。図 17 に示すように、逆回転加工の場合、ドレス・加工を繰り返し薄くなった研磨パッドにおいて加工能力がより大きく向上した。加工前の新品状態の研磨パッドよりも加工能力が向上したのは複数

Fig. 15 3D profiles of the pad surfaces

Fig. 16 SEM images of the pad surfaces

枚工作物の加工時と同様、研磨パッド表層の開孔径が大きい状態となり、かつ倒れていた表層が掘り起こされることにより、砥粒の目づまりが抑制されたためと考えられる。

工作物エッジ部については、図 18 に示すように、逆回転加工において平坦性も大きく向上した。この理由については以下のように考えられる。図 15 (a)、図 16 (a) のように研磨パッド表層の倒れが大きい場合、砥粒は研磨パッド-工作物間の連続接触部分の奥へ入り込めなくなる。その結果、工作物エッジ部の方が工作物中央部に比べて相対的に作用砥粒数が多くなり、除去作用も大きくなったため、エッジ部平坦性が劣化したと考えられる。一方、逆回転加工の場合、研磨パッドの表層の倒れを掘り起こす方向に工作物が摺動するため、研磨パッドと工作物の連続接触部分が小さくなり、工作物エッジ部の平坦性の劣化が抑制されたと考えられるが、今後のさらなる詳細な検討を要する。

逆回転加工後の工作物表面粗さについて評価を行った。評価には Bruker AXS 製の原子間力顕微鏡 Dimension 3100V を使用した。図 19 に示すように、工作物表面粗さについても向上した。これは加工後の工作物エッジ部の平坦性が向上したのと同様、倒れた表層が掘り起こされることにより、研磨パッド-工作物間の接触部分が断続的になることで砥粒が研磨パッド-工作物接触部分により均一に供給されたためと推測される。

次に、この逆回転加工の効果の持続性について検討した。まずドレスにより大きく摩耗した研磨パッドにおいて通常の順回転加工を行い、続いて逆回転加工を継続して行った。研磨パッドの表面状態を整えるため、20 分間の加工を 2 回行うごとに、10 分間のドレス、10 分間の予備加工を行った。加工能率の時間的推移を図 20 に示す。このように逆回転加工を数バッチ行っても、加工能率は順回転加工よりも高いことがわかった。

Fig. 17 Material removal rate with thickness of pad

Fig. 18 ROA/removal amount with thickness of pad

Fig. 19 AFM images of workpiece surfaces

Fig. 20 Material removal rate with polishing time

4. 結 言

ガラス磁気ディスク基板の仕上げ用研磨パッドであるスエード研磨パッドの表面状態，すなわちナップ層の倒れ状態に着目した研磨加工モデルを提案し，研磨パッド-工作物間の接触部分を断続的にすることが加工能率の向上に有効であることを明らかにした．そして，その加工モデルにもとづき，バフ加工を用いることで表面構造に倒れない研磨パッドを作製した．また，表面構造が倒れないように研磨定盤を逆回転させる新しい加工方式を提案した．その結果，いずれにおいてもガラスディスクを高能率かつ高平坦に研磨加工することができた．

本研究の遂行にあたりご協力を賜りました，フジボウ愛媛株式会社に深く感謝の意を表します．

文 献

- (1) Zhao, Y., and Chang, L., “A Micro-Contact and Wear Model for Chemical-Mechanical Polishing of Silicon Wafers”, *Wear*, No. 252 (2002), pp. 220-226.
- (2) Wang, C., Sherman, P., Chandra, A., and Dornfeld, D., “Pad Surface Roughness and Slurry Particle Size Distribution Effects on Material Removal Rate in Chemical Mechanical Planarization”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 54, 2005, pp. 309-312.
- (3) 安井平司, 高木正孝, 田中勇輔, “アルミ磁気ディスクポリシング用ポリシャの開発 (第1報)”, 精密工学会誌, Vol. 76, No. 3 (2010), pp. 322-326.
- (4) 安井平司, “ガラス磁気ディスク基板の超平滑ポリシング (第1報)”, 精密工学会誌, Vol. 70, No. 9 (2004), pp. 1206-1210.
- (5) 安井平司, 山口寛太, 松川誠治, 山崎穰, “アルミ磁気ディスク基板の超高圧力・超高速度ポリシングにおけるポリシャ寿命の検討 (第1報)”, 精密工学会誌, Vol. 73, No. 1 (2007), pp. 107-111.
- (6) Luo, J., and Dornfeld, D., “Material Removal Mechanism in Chemical Mechanical Polishing: Theory and Modeling”, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 14, No. 2 (2001), pp. 112-133.