新概念高能率超平滑両面ポリシング盤の開発（第1報）*

— 装置の試作と一、二の実験結果 —

安井 平司** 山口 寛太*** 栗林 将司†

Development of High Efficient Double Side Surface Polishing Machine Based on the New Concept (1st Report)

— Trial Manufacturing of Machine and Some Experiments —

Heiji YASUI, Kanta YAMAGUCHI and Syoji KURIBAYASHI

High efficient and ultra-smoothness double side surface polishing method based on the new concept is devised. To examine the effect of the polishing method, the new type of polishing machine is manufactured on trial. The machine is available for the experiment up to polishing pressure of 60kPa and polishing speed of 18m/s in the specification of the design in the case of 3.5inch magnetic disk substrate. The mechanism of the new polishing machine is based on rotating the workpiece by the friction force of reverse directions to each other, which are caused from the contact between workpiece and upper or lower polishing plate. From some examinations on polishing of magnetic disk substrate, the method is ascertained useful for ultra-smoothness polishing with high removal rate.

Key words : gearless polishing machine, new concept, ultra-smoothness polishing, magnetic disk substrate, aluminum type, ultra-high polishing speed, ultra-high polishing pressure, high removal rate, colloidal silica abrasive

1. はじめに

近年の情報技術の進展に伴い、ハードディスク基板、シリコン基板、化合物半導体材料、ガラス材料、セラミックス材料等の厚さの薄い高品位製品の重要性が増している。両面ポリシング加工は、それらの高品位製品の最終加工に使用されており、その高品位化に加えて、低価格化への要求が増大している。この観点から、筆者らの一人は、先にハードディスクに使用される磁気ディスク基板を工作物として、ポリシング加工能率の向上を目標に、高速度・高圧力で片面ポリシング加工を行い、従来の除去速度の数倍となる結果を得た^{1)~3)}。

その結果を基にして、高速度・高圧力のポリシング加工法を両面ポリシング加工に適用することを考えたが、現在一般的に使用されている両面ポリシング盤では、厚さの薄い工作物をキャリアで保持し、そのキャリア外周上の歯車を用いて、キャリアとともに工作物を回転するので、キャリアに大きな負荷がかかり、実施が難しいことがわかった。

そこで、本報では、歯車機構を有しない、高速度・高圧力ポリシング加工が可能な新概念の両面ポリシング法を考案するとともに、考案した方法を適用した両面ポリシング盤を設計・試作した。そして、その装置を用いて、従来の方法では設定し得なかった、高速度・高圧力の条件で磁気ディスク基板の両面ポリシング加工を試み、高除去速度ポリシングが可能であることを確かめたので、以下に結果を報告する。

2. 新概念両面ポリシング加工法

現在、一般的に磁気ディスク基板のポリシング加工に使用されている両面ポリシング方法(4ウェイ方式)の概略図を図1に示す。この方法では、中央のサンギアと外周部のインターナルギアにより、外周に歯車刃先を有する工作物保持用のキャリアを回転させて加工を行う。工作物はキャリアに空けられた穴に保

Fig.1 Conventional double side surface polishing method

(a) Polishing mechanism

(b) Contact of polisher with substrate

Fig.2 Concept of new double side surface polishing method using two pieces of stepped plates

持する。工作物は歯車によるキャリアの回転により遊星運動を行い、均一な加工が可能となる。

しかし、この歯車機構を有する方法を用いて、高速度・高圧力の条件で両面ポリシング加工を行おうとすると、キャリアを回転させるために必要な動力が大きなものとなり、キャリア外

* 原稿受付 平成 19 年 1 月 15 日

** 正 会 員 熊本大学大学院自然科学研究科（熊本市黒髪 2-39-1）

*** 学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科（熊本市黒髪 2-39-1）

† 熊本大学大学院（現、ジャトコ株式会社：静岡県富士市今泉 700-1）

Fig.3 Revolving method of workpiece using the difference between the friction force at outer and inner contacts of polisher with substrate

Fig.4 Surface of NiP magnetic disk substrate polished by flat polisher polishing method

周の歯車刃先への負荷が増大してしまう。また、大きなポリシング速度では、キャリアの回転も高速になり、キャリアへの負担は大きい。このようなことから、キャリアの歯車機構を用いて工作物を遊星運動させる両面ポリシング加工では、磁気ディスク基板のような薄い工作物に、高速度・高圧力条件を適用することは難しい。そこで、キャリアを回転させないで、工作物の回転を行い得る、新しい両面ポリシング法を考案した。

図2に、考案した両面ポリシング加工法の概念図を示す。この両面ポリシング加工法において、均一なポリシング加工を行う上で必要不可欠である工作物の回転方法は次の通りである。図に示すように、上下のポリシング定盤には段差形状の加工を施してある。段差形状は、上下定盤で異なって加工されており、上定盤では、定盤内周側からキャリアの工作物保持中心位置より少し外周側まで、突き出た段差付き形状となっている。一方、下定盤では、定盤外周側からキャリアの工作物保持中心位置より少し内周側まで突き出た段差付き形状となっている。これらの上下平行定盤間に配置されたキャリアで保持された工作物に、上下定盤上に貼付したポリシャを押し付け、上定盤と下定盤を逆回転させる。そして、工作物と上下定盤上に貼付されたポリシャとの間に逆方向摩擦力による偶力を発生させ、工作物をキャリア内で回転運動させるものである。キャリアは回転せず固定されているので、高速度・高圧力のポリシング条件においても大きな負荷に耐えることができる。また、歯車を回転させる複雑な機構を必要としないので、装置を低価格で製作することが出来ると考えられる。

このような段差付き定盤を用いた方法ではなく、図3に示すような段差付きでない定盤にポリシャを貼付し、片面ラッピングで行われているような工作物の内外周において作用する力の差を利用する原理⁴⁾を用いて、定盤を同一方向に回転する方法(平坦ポリシャポリシング法と記す)も考えられた。しかし、そのような方法を、後述の図に示す試作した両面ポリシング盤で行ったところ、図4に示すような結果となった。図4(a)は、加工した磁気ディスク基板表面を光干渉式表面粗さ測定器 WYKO で測定した結果である。図より、ポリシング実験により得られ

Fig.5 Forces acting to the substrate in flat polisher polishing method

Fig.6 Relationship between integrated revolving torque and substrate radius

た基板表面には深い同一方向の条痕がみられ、深さ数百ナノメートルの条痕が規則正しく刻まれていることがわかる。そこで、さらに基板上を数点測定して調べた加工面内に形成された条痕の方向を、図4(b)に概略図で示す。図に示すように、基板に形成された条痕は、図中の矢印で示した定盤回転方向と一致しており、基板はキャリア内で自転運動を行わず、停止した状態で加工が進んだと考えられる。

図3のポリシング加工法における基板の回転力発生機構は、次のように考えられる。図5に、ポリシング定盤上においた基板とキャリアの設置状態と基板に作用する力を示す。図に示すように、加工中の基板には、回転するポリシャの摩擦による基板回転トルク T_r と、基板がキャリアに定盤回転方向に押し付けられることで発生する接触力 F_{ca} が作用する。このとき、微小領域 $rd\theta dr$ に働く回転トルク dT_r は、摩擦力の基板回転方向分力 dF_r を用いて式(1)で表され、基板に作用する基板回転トルク T_r は、式(2)により算出される。

$$dT_r = r dF_r = r^2 \mu P \cos(\theta_1 - \theta_2) d\theta dr \quad (1)$$

$$T_r = \mu P \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} r^2 \cos(\theta_1 - \theta_2) d\theta dr \quad (2)$$

$$\text{ただし, } \theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{r \sin \theta_1}{R + r \cos \theta_1} \right)$$

P : ポリシング圧力, μ : 摩擦係数

図6は、図5に示すポリシングにおける諸元を用い、上式により基板回転トルク T_r を計算した結果である。定盤中心より基板中心までの距離 $R=96\text{mm}$ 、加工圧力を 10kPa としている。図よ

Fig.7 Schematic view of the new double side surface polishing machine manufactured on trial

Table1 Specifications of the new double side surface polishing machine

Polishing load	Max. W_L : 1.3kN
Plate revolution	Max. N_P : 1800min ⁻¹
Plate diameter	305mm
Plate stroke	200mm
Driving motor	3.7kW×2
Machine size	800W×800L×1900Hmm

り、回転トルクは正であり、基板に作用する他の抵抗が無ければ、基板は時計方向に回転することが出来る。

しかし、この回転トルク T_t により、基板が回転しようとする、接触力 F_{ca} によって基板回転方向とは逆の摩擦力 F_t による反回転トルク T_r が生じる。したがって、 $\Delta T = T_t - T_r > 0$ となる場合に基板の回転が起きることになる。ところで、ポリシャと基板との摩擦力のみで基板を回転させ、高速度・高圧力のポリシングを行おうとする本方法では、基板とキャリアとの接触圧力が大きくなる。また、キャリア材料も比較的剛性の高いガラスとエポキシの複合材料を用いているため、摩擦係数も比較的大きい。このため、基板回転方向とは逆の摩擦力 F_t が大きくなり T_r が大きくなる。その結果、 $\Delta T = T_t - T_r < 0$ となり、図4に示したように、基板が回転しなかったものと考えられる。

上述の図2に示した、段差付き定盤を用い、上下定盤を互いに逆方向に回転する方法は、(1) T_t を増加するとともに、(2) 工作物とキャリアとの接触力 F_{ca} を、上下定盤を異なる方向に回転することで小さくし、基板回転方向とは逆の摩擦力 F_t を小さくする。そして、反回転トルク T_r を小さくし、ポリシャと基板の摩擦力のみで工作物を安定的に回転させることを目指したもので、後述のように、十分に可能である。

3. ポリシング盤の試作

3.1 装置概要

考案した両面ポリシング法の有用性を確認するために、試験装置を製作した。試作した両面ポリシング盤の模式図と主な仕様を図7と表1に示す。このポリシング盤の主要機構部を、大きく分けると、(1) ポリシャが貼付された上回転定盤、(2) 工作物を保持するキャリア、(3) ポリシャが貼付された下回転定盤で構成される。上定盤系は、装置上部のハンドルを回すことで、4

Fig.8 Polisher surface damaged by polishing temperature rise in no cooling polishing

Fig.9 Plate cooling method using water circulating inside plate

本の柱に沿って上下にスライドし、このスライド部は滑車を介して装置側部のバランサと釣りあっている。なお、定盤の段差は $50\mu\text{m}$ とした。ポリシング荷重の設定はデッドウェイト方式を採用し、上定盤系の重量をバランサ荷重で除荷することにより設定する。荷重は最大で 1.3kN まで負荷することができる。また、上下回転定盤はそれぞれカップリングを介してモーターに直接接続されている。各モーターはインバータによって個別に制御され、回転数を任意に設定できる。モーターは 3.7kW(4極)のものを使用した。定盤直径は 305mm とし、3.5inch タイプの磁気ディスク基板を、同時に3枚処理することができるようにした。設計上は、この 3.5inch 磁気ディスク基板3枚の加工を、ポリシング速度 18m/s、ポリシング圧力 60kPa 程度までの条件で行うことができる。ポリシング液は、上定盤にあけた供給口より加工部に供給する。

3.2 ポリシング定盤の冷却システム

図8に、試作した装置を用いてポリシング速度 6.0m/s、ポリシング圧力 34.3kPa の条件で加工した場合のポリシャ表面の観察結果を示す。図より、ポリシャ表面が剝離しているのがわかる。本条件のような大きな除去速度が得られる超高速度・超高圧力ポリシング条件では、加工部で大きな熱発生が起こる。その結果、ポリシャ表面温度が非常に高くなり、ポリシャの強度が低下したと考えられる。

そこで、その温度上昇を抑制するために、図9に示すように、ポリシング定盤を二層構造にし、その間に水を循環させるような方策を検討した。図10に、ポリシング速度 6.0m/s、ポリシング圧力 34.3kPa の条件における、ポリシング時間と定盤温度の関係を示す。なお、ポリシャを貼り付けた加工面とは逆側の上定盤表面を赤外線非接触温度計を用いて測定した。図よりわかる

Fig.10 Influence of plate cooling on plate surface temperature rise in polishing at the conditions of ultra-high pressure and speed

ように、水冷却がない場合には、定盤温度は 70℃を超えるが、水冷却を施すと、ほぼ供給水の温度に留まり、超高速度・超高压ポリシングによる温度上昇を抑制することができた。そして、安定的なポリシングが行い得ることを確認した。この結果は、加工点の温度ではなく定盤の温度の測定したものであるため、実際の加工点の温度は測定結果よりも上昇していることが考えられるが、定盤冷却のポリシャ温度上昇への抑制効果は非常に大きいものと考えられる。

3.3 基板上下面の除去速度の均一化

試作した装置では、キャリア内での基板の自転を得るために、上下定盤でポリシャと工作物の接触状態に差を設け、工作物にはたらく回転力を増大させている。しかしながら、このように基板上下面でポリシャと工作物との接触状態が異なると、上下定盤において、ポリシャと基板との平均接触速度、すなわち、ポリシング速度が異なるので、基板の上下表面で除去速度に差が生じることが考えられる。そこで、別報¹⁾で示している、除去速度はポリシング速度によって変化することを利用して、基板上下の除去速度を制御することを検討した。

図 11 に、上下ポリシング定盤の回転数比を変化させた時の、基板上下面の表面粗さの変化を示す。表面粗さは、後述の図 13 で示す終末表面粗さに達する前の短い時間で評価した。図より、上下定盤の回転数比が、上定盤：下定盤=1：1 の場合では、基板上面の粗さは、三次元測定表面粗さで $Hra_{(3D)}=0.45nm(Ra)$ となり、基板下面の表面粗さの $Hra_{(3D)}=0.67nm(Ra)$ よりも明確に良い仕上面になっている。しかし、回転数比が、上定盤：下定盤=0.875：1 の場合では、上下面ともに $Hra_{(3D)}=0.4nm(Ra)$ 程度と表面粗さに違いがみられない。この結果より、上定盤：下定盤=1：1 の場合では、基板除去厚さが基板上面の方が大きくなる。一方、上定盤：下定盤=0.875：1 では、この段階での除去厚さが等しくなっていると考えられ、上下定盤の回転数を適切に設定することで、基板上下面の除去速度を均一化できることがわかった。

4. 実験条件

主な実験条件を表 2 に示す。使用した工作物は、ニッケルリン無電解めっき型アルミニウム磁気ディスク基板の 3.5inch タイプのものである。ポリシャはスウェードタイプのものを使用し、ポリシング液には、コロイダルシリカ砥粒の砥粒径 80nm のものを用いた。また、ポリシング液の供給量は毎分 50ml とした。

基板平滑度の測定には、光干渉式表面粗さ測定器 (WYKO TOPO-3D) を使用した。なお、測定長 242μm の算術平均粗さ (二次元測定 of Ra 値) を表面粗さ Hra とした。 Hra は、基板表面の 4 ヶ所で 5 点測定し、それら合計 20 点の測定値の平均値によ

Fig.11 Adjustment of revolving ratio for equaling the removal depth of upper and lower substrate surfaces
[Colloidal silica, Va : 3.0m/s, P : 34kPa, Polishing time: 2min]

Table 2 Experimental conditions

Work piece	NiP plated aluminum magnetic disk substrate (3.5inch type : $\phi 95mm \times \phi 25mm \times 1.27mm$)
Polisher	Suede type
Polishing fluid	Abrasives : Colloidal silica ($\phi 80nm$) Supply flux Lg : 50 ml/min
Polishing conditions	Polishing pressure P : 12 , 24kPa Polishing speed Va : 1.5 , 6.0m/s

て評価を行った。基板除去厚さ Tp は、ポリシング加工前後の基板重量を電子天秤により測定し、それを基板両面の表面積およびニッケルリンの比重により除して算出した。

実験は、一般的な磁気ディスク基板のポリシング加工において、最も高速度・高圧力の条件の範囲にある、ポリシング速度 1.5m/s、ポリシング圧力 10kPa を大きく上回る、ポリシング速度 6.0m/s、ポリシング圧力 24kPa の条件を設定して行った。以下、この一般的な高速度・高圧力のポリシング条件を上回るポリシング条件を超高速度・超高压力のポリシング条件と記す。

5. 実験結果及び考察

図 12 に、ポリシング速度 6.0m/s、ポリシング圧力 24kPa の条件での、ポリシング時間による除去厚さの変化を示す。なお、比較するために、一般的な磁気ディスク基板のポリシング加工において、最も高速度・高圧力の条件の範囲にある、ポリシング速度 1.5m/s、ポリシング圧力 10kPa の条件での結果も合わせて示す。図より、両ポリシング条件の場合とも、除去厚さはポリシング時間に比例して増加することがわかる。図 13 に、ポリシング時間と基板表面粗さの関係を示す。両ポリシング条件の場合とも表面粗さは、初期の除去厚さが小さい段階で急速に平滑化が進み、その後ある一定の表面粗さに収束する(以下、この収束した表面粗さの値を終末表面粗さ(Hra_t)と記す)傾向を示している。また、終末表面粗さはポリシング条件による違いはほとんど見られず、同程度の値をとっていることがわかる。図 14 に、

Fig.12 Change of removal depth with polishing time

Fig.13 Relationship between polishing time and surface roughness

終末表面粗さ時における三次元測定表面粗さを示す。図より、どちらの加工表面にもスクラッチなどの表面欠陥は確認されず、比較的良好な加工を行うことができたことがわかる。この結果からも、先に報告した片面ポリシングの結果と同様に、ポリシング条件による終末表面粗さへの影響は小さいことが確認できる。

図15に、図12および図14に示した、高速度・高圧力ポリシング条件と超高速度・超高圧力ポリシング条件における除去速度と終末表面粗さの関係を整理して示す。なお、実験では、同時に3枚の磁気ディスク基板の加工を行うことができるので、除去速度の評価には同時に処理した3枚の基板の平均値を用いた。図より、高速度・高圧力ポリシング条件で加工した場合では、除去速度が $0.12\mu\text{m}/\text{min}$ 程度であるのに対し、ポリシング速度を4倍、ポリシング圧力を2倍にした、超高速度・超高圧力のポリシング加工では、除去速度は $0.28\mu\text{m}/\text{min}$ と約2.5倍になるのがわかる。一方、その時の終末表面粗さ(H_{ra})は、どちらの条件においてもほとんど差が無く、約 0.27nm と比較的良好な平滑度であった。

これらの結果から、試作した新概念の両面ポリシング盤においては、一般的な歯車を使用する両面ポリシング盤では実現し得なかった超高速度・超高圧力のポリシング加工が可能であることが確認できた。これは、上述したポリシング定盤の段差形状により、基板とポリシャの接触状態に内外周で差が生じたことにより、ポリシャと基板との間にはたらく摩擦力が大きな回転力となり、基板がキャリア内で安定した自転運動を行うことができたためと考えられる。

さらに、除去速度と表面粗さの結果は、先に行った片面ポリシング盤における実験結果^{1)~3)}と同様の傾向を示しており、本加工法において、安定した超高速度・超高圧力の両面ポリシング加工を行うことができたと言える。

Fig.14 Influence of polishing conditions on surface smoothness of polished substrate.

[Polisher :Suede-type, Abrasive :SiO₂]

Fig.15 Influence of ultra-high polishing pressure and velocity on removal rate and surface smoothness

6. ま と め

現在一般的に用いられている両面ポリシング盤で行われている条件よりも、はるかに高速度・高圧力ポリシング加工が可能な新概念の両面ポリシング法を考案し、その方法を適用した超高速度・超高圧力用両面ポリシング盤を試作した。そして、装置を用いて磁気ディスク基板の両面ポリシング実験を試みた。主な結果は、以下の通りである。

- 1) 新しく開発した両面ポリシング盤は、現在一般的に使用されている高速度・高圧力ポリシング条件の4倍の速度と2倍の圧力での加工が可能である。
- 2) 本研究における超高速度・超高圧力条件での両面ポリシング結果を、既存装置の高速度・高圧力条件での結果と比較すると表面粗さは同程度で、除去速度は約2.5倍になる。

本研究を行うまでの経過的研究において支援を得た岩尾智浩氏と前岡俊介氏、ならびに、アルミ型磁気ディスク基板、ポリシャおよび研磨液をご提供頂いた東洋鋼鋳鋼、フジボウ愛媛鋼、(株)花王に謝意を表する。なお、本研究の一部は、平成17年度科学研究費補助金(基盤研究(B):17360065)によって行った。

参 考 文 献

- 1) H.YASUI, T.FUKAMACHI, S.SAKAMOTO, S.TAKAKURA: High Removal Rate Ultra-Smoothness Polishing of NiP Plated Aluminum Magnetic Disk Substrate by Means of High Polishing Speed with High Polishing Pressure, Proc. ASPE 18th Annual Meeting (2002) 447.
- 2) 安井平司, 松川誠治・山崎穰: アルミ磁気ディスク基板の高能率超平滑ポリシング(第1報)―高ポリシング速度の効果―, 2004年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2004) 447.
- 3) 安井平司, 山崎穰, 松川誠治: アルミ磁気ディスク基板の高能率超平滑ポリシング(第2報)―高ポリシング圧力の効果―, 2004年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2004) 449.
- 4) 津和秀夫: 機械加工学, 養賢堂 (2003) 287.