アルミ磁気ディスク基板の超高圧力・超高速ポリシング におけるポリシャ寿命の検討（第2報）*

— 超高圧力・超高速ポリシングにおけるポリシャ寿命に及ぼすポリシャ表面構造の影響 —

山口寛太** 安井平司*** 松川誠治† 仁木拓也** 高木正孝††

Investigations on Polisher Life in Ultra-high Pressure and Speed Polishing of Aluminum Type of Magnetic Disk Substrate (2nd Report)
— Influence of Polisher Surface Structure on Polisher Life in the Polishing Condition of Ultra-high Pressure and High Speed —

Kanta YAMAGUCHI, Heiji YASUI, Seiji MATSUKAWA, Takuya NIKI and Masataka TAKAGI

By using ultra-high pressure and speed polishing, the research aims to develop the ultra-high removal rate polishing technique under the ultra-smoothness polishing of magnetic disk substrate. In the report, the influence of polisher surface structure on polisher life is experimentally examined and discussed by comparing the change of removal rate with polishing process for two types of polisher surface structures. Polishing pressure ranges from 10kPa to 60kPa under the polishing speed of 1.5m/s. The polishing pressure of 10kPa and polishing speed of 1.5m/s are near the highest in the region of polishing conditions used generally at the present polishing operation. The surface structure of polishers used is single and double NAP layers. In case of the double layer polisher, only the first two steps, that is, the first transitional polishing process and the steady polishing process among the four steps which is found in the change of removal rate with polishing process for the single layer polisher are ascertained. The polisher life can not be found at the polishing pressure of 10kPa. In the ultra-high pressure condition of 60kPa, the removal rate for both the single and double layer polishers becomes about four times larger than that in the 10kPa. The polishing pressure has little influence on surface smoothness.

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

1. はじめに

近年における磁気ディスク装置の低価格化に伴って、磁気ディスク基板のポリシング加工においても、高能率が益々強く求められている。この観点から、本研究は、既存の高除去速度の数倍以上になる超高除去速度技術を構築することを目標にしている。この目標達成のために、既存の超圧力・超高速条件の数倍以上の超圧力・超高速条件でのポリシング加工法の開発を考えている¹⁾。ところで、除去速度は、ポリシング条件によって一義的に決められるものではなく、ポリシャの表面構造によって変化し、ポリシング過程における表面状態変化によっても影響を受ける²⁾。

そこで、前報¹⁾では、開発のための基礎的検討として、一層表面構造のスエードタイプポリシャを用いて、超圧力・超高速条件でのポリシングによるポリシャ表面状態変化と除去速度変化の関係やポリシャ寿命等を調べた。用いた砥粒と基板は、コロイダルシリカ砥粒と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（以下、アルミタイプ基板と記す）である。その結果、既存の超圧力・超高速条件では、除去速度は、初期過渡過程、定常過程、後期過渡過程、寿命過程の4段階に変化することがわかった。寿命過程での除去速度は、定常過程の1/5以下になり、ポリシャ表面層にある空孔内への砥粒の堆積がポリシャの寿命に大きな影響を及ぼしていることを示した。一方、超圧力・超高速条件では、除去速度変化が最初の2段階だけしか現れず、3段階目以降は極めて長いポリシング時間になっても生じないことを見いだした。

本報では、引き続き、前報と表面構造が異なる二層構造のス

Fig.1 Schematic view of the polishing machine

Fig.2 Plate cooling method using water circulation inside the plate

エードタイプポリシャを用い、超圧力・超高速条件における除去速度の変化に及ぼすポリシャ表面構造の影響を検討した。

2. 超圧力・超高速ポリシング実験用装置

使用したポリシング装置を図1に示す。従来使用していた片持ち型ポリシング装置²⁾では、超圧力・超高速ポリシング実験を実施するのは困難であったので、門型のポリシング装置を新たに試作した¹⁾。その詳細は、前報で記したので、ここでは省

* 原稿受付 平成19年3月16日

** 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）

*** 正会員 熊本大学大学院自然科学研究科

† 熊本大学大学院

（現、九州日本電気株式会社：熊本市八幡一丁目1番1号）

†† 熊本大学大学院自然科学研究科

Table1 Experimental conditions

Workpiece	NiP plated magnetic disk substrate (3.5inch type : $\phi 95 \times \phi 25 \times 1.27\text{mm}$)
Polisher	Suede-type
Carrier	Thickness Ct : 0.6mm
Cooling water	Supply flux 5 l/min (Tap water)
Polishing fluid	Abrasives : SiO ₂ Content of abrasives Cg : 5.0wt% Supply flux Lg : 20ml/min
Polishing conditions	Polishing pressure P : 10, 60 kPa Polishing speed Va : 1.5 m/s

Fig.3 Comparison of surface structure of single layer with double layer

略するが、この実験装置に、従来型ポリシング定盤を取付けて、超高圧力・超高速ポリシングを行うと、ポリシャの一部がポリシング定盤との貼り付け部において短時間で剥離した¹⁾。これは、ポリシング温度が非常に高くなることに起因していた。そこで、ポリシング温度上昇を抑制するために、図2に示すように、ポリシング定盤を二層構造にし、その間に水道水を循環させた³⁾。なお、定盤材料はアルミニウム合金で、直径は300mmである。その結果、超高圧力・超高速に起因するポリシング温度上昇は、大幅に抑制され³⁾、長時間のポリシングでも安定した加工ができるようになった。

3. 実験方法および条件

実験は、装置周辺がクラス300に対応する環境で行った²⁾。表1に主な実験条件を示す。基板には、通称3.5インチ（直径約95mm）のものを使用した。寿命試験は、各基板の除去厚さがNiP膜厚に達する前にポリシングを終え、基板を交換しながら行った。砥粒にはコロイダルシリカを用いた。ポリシャは前報で使用した図3(a)の一層構造のもの（以下、一層ポリシャと記す）に対して、図3(b)に示す二層構造のスエードタイプ（以下、二層ポリシャと記す）を使用した。二層ポリシャはナップ層が上層と下層で構成されている。上層は、比較的小さな規模の空孔（細孔）で構成され、下層は一層構造と同じような大きな空孔（大空孔）で構成されている。なお、空孔の周囲には、壁状膜があり、その膜内には、図3(a)のポリシャ表面拡大図で示す、5μm以下の微小空孔が存在する。基板表面の測定には、光干涉式表面粗さ測定器WYKOを使用した。基板表面の平滑度は、測定長240μmのRa値を表面粗さ $H_{ra}(\text{nm})$ 、測定長4mmのRa値を微小うねり $H_{wa}(\text{nm})$ とし、基板の4ヶ所で各5点、計20点測定し、その平均値で評価した。また、除去厚さ $T_p(\mu\text{m})$ はポリシング前後の基板重量を電子天秤で測定して除去量を算出し、ニッケルリンの比重と基板の面積で除すことにより求めた。ポリシング抵抗は、装置に付属するポリシング抵抗測定装置¹⁾により測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 ポリシング過程における除去速度変化

図4に、一層ポリシャと二層ポリシャを用いてポリシングを行

Fig.4 Comparison of the change of removal depth with polishing time using single layer polisher and double layer polisher

Fig.5 Comparison of the change of removal rate with polishing time using single layer polisher and double layer polisher

Fig.6 Comparison of the new polisher surface with that after polishing for 340min in the single layer type

[Polar: Suede type, Abrasive: SiO₂, Tp=20μm, P=10kPa, Va=1.5m/s]

った場合のポリシング時間と除去厚さの関係を比較して示す。現状で使用されている既存の高圧力 $P=10\text{kPa}$ と高速度 $Va=1.5\text{m/s}$ の条件を用いた。図より、両ポリシャの場合とも、除去厚さはポリシング初期に大きく増加後、増加速度が緩やかになる。さらにポリシングを進めると、一層ポリシャの場合は、その増加速度は、あるポリシング時間まで維持される。しかし、一定のポリシング時間を超えると、急激に増加速度が小さくなっていく。最終的に、除去厚さがほとんど増加しなくなり、ポリシャの寿命となる。一方、二層ポリシャの場合は、一層ポリシャの場合とは異なり、一層ポリシャで除去厚さの増加が非常に小さくなるポリシング時間になっても、引き続き除去厚さは時間とともに直線的に増加する。

図5に、図4の結果をポリシング時間と除去速度の関係に書き換えて示す。なお、図中の(S)と(D)は一層と二層のポリシャを示す。図より、一層ポリシャの除去速度は、初期過渡過程(図5の1st(S)過程)から定常過程(図5の2nd(S)過程)に至る最初のポリシング過程では、二層ポリシャよりも幾分か大きい。しかし、ポリシング過程が進んで、後期過渡過程(図5の3rd(S)過程)以降になると、二層ポリシャの場合よりも除去速度が格段に小さくなっていき、最終的にポリシャの寿命になる。寿命過程での除

Fig.7 Change of polisher surface with polishing time in the double layer type

[Polisher: Suede type, Abrasive: SiO₂, Lg=20ml/min, P=10kPa, Va=1.5m/s]

去速度は二層ポリシャの 1/5 以下にまで減少する。一方、二層ポリシャの場合、同じ段階での除去速度の減少は見られない。さらに、二層ポリシャの寿命の有無を検討するために、一層ポリシャで寿命となるポリシング時間の 10 倍に相当する 3000 分 (50 時間) のポリシングを行っても、約 0.05μm/min の除去速度がほぼ維持されていた。

図 6 に、前報¹⁾において報告した、一層ポリシャの寿命状態におけるポリシャ表面および断面の観察結果を再掲して示す。図よりわかるように、寿命状態のポリシャの空孔は最深部に至るまで砥粒で埋め尽くされている。

図 7 および図 8 に、二層ポリシャの除去速度変化を検討するために調べた、ポリシャの表面および断面の変化を示す。この観察試料には、図 4 の実験の際にポリシャ表面から切取った細片を用いた。図 7 より、ポリシング前のポリシャ表面には突起状ナップ部が存在する。突起状ナップ部は、ポリシャ製造時に行われる目直しの際の削り残しと考えられる。この突起状ナップ部は、初期過渡過程を終えるポリシング時間 100 分までに除去され、摩耗平坦面が形成される。摩耗平坦面では、ポリシング前に存在した壁状膜の 5μm 以下の微小空孔は見られない。しかし、一層ポリシャで見られたような、砥粒がポリシャの大空孔底からポリシャ摩耗平坦面まで完全に埋め尽くすような傾向は見られない。図 7(d) のポリシング時間 t=2000min に示すように、ポリシャ細孔層表面の一部に見られる底の浅い空孔内に堆積した砥粒表面 A と摩耗平坦面 B との間には、小さな段差が見られる。また、細孔の大きさやポリシャ摩耗平坦部の大きさは、加工時間が進んでもほぼ同じである。図 8 のポリシャ断面の変化を見ると、図 8(a) の使用前では、空孔の境界となる壁状膜の輪郭が明確である。これに対し、ポリシングを行うと、境界が不明瞭となり、多少の砥粒の堆積が見られる。しかし、図 6 の一層ポリシャの寿命で見られたような砥粒で埋め尽くされる状態とはならない。特に、下層部では、ポリシング時間 3000 分でも、依然として大きな空孔が維持されている。これらのことから、本実験で使用した二層ポリシャは、一層ポリシャよりもコロイダルシリカ砥粒の堆積がかなり少なくなる構造であると思われる。このため、表面の細孔層部分が摩耗し、一層ポリシャの状

Fig.8 Change of polisher section with polishing time in the double layer type

[Polisher: Suede type, Abrasive: SiO₂, Lg=20ml/min, P=10kPa, Va=1.5m/s]

Fig.9 Comparison of the change of polishing force with polishing time using single layer polisher and double layer polisher

態に近づくまで、定常状態を維持することが予測される。

図 9 に、ポリシング抵抗の変化を、一層ポリシャと二層ポリシャで比較して示す。図 5 と図 9 を対照してわかるように、一層と二層の両ポリシャとも、ポリシング抵抗の変化はポリシング除去速度の変化に対応しており、除去速度が減少すると、ポリシング抵抗が減少する。ここで、この現象を考察してみる。

初期過渡過程では、突起状ナップ部が除去され、ポリシャ表面の平坦化が行われる。このため、ポリシング作用にかかわる砥粒数 N_g は増加し、一方、個々の砥粒に作用する荷重 w_g は減少すると考えられる。しかし、いずれの過程においても、ポリシング荷重 W に対して $W = N_g \cdot w_g$ が成立する。ポリシング除去速度 M は、個々の砥粒による基板除去速度 m_g と N_g の積である。ここで、 m_g が球形の砥粒を基板に押し込んだ場合の砥粒移動方向に垂直な断面積 s_g に比例しているとする、 s_g は w_g と比例関係にある⁴⁾。これらから、次のような関係式が成立する。

$$M \propto N_g \cdot m_g \propto N_g \cdot s_g \propto N_g \cdot w_g = N_g \cdot (W/N_g) = W \quad (1)$$

すなわち、単純なモデルを考えると、除去速度 M はポリシング荷重 W のみに関係し、ポリシャ表面が変化しても除去速度は変化しない。しかし実際には、ポリシング初期の方が定常過程よりも大きな除去速度になる。そこでこのようになるのは、摩耗平坦化した定常過程のポリシャ表面と比較して、初期ポリシャ表面では、突起状ナップ部や微小空孔があり砥粒の移動を妨げるため、基板除去に大きな役割を果たすものと考えている。ポリシング抵抗は、個々の砥粒による基板除去に伴って生じるポリシング抵抗の総和であり、このような除去速度の変化に係りて変化しているといえる。

次いで、一層ポリシャ寿命時におけるポリシング除去速度と抵抗については、図 10 に示すような、空孔が砥粒に埋め尽くされたポリシャと基板との接触状態モデルを考える。図において、ポリシャ寿命時のポリシング荷重 W は、ポリシャ平坦部で保持

Fig.10 Contact model between substrate and polisher at the life time polisher of single layer type

された砥粒群と空孔内の砥粒群で支持されるとし、それらで支持する荷重を W_p と W_g で示している。この図より、次のような関係式が成立する。

$$W = \Sigma w_{pi} + \Sigma w_{gi} = W_p + W_g \quad (2)$$

$$F_t = F_p + F_g = \Sigma f_{pi} + \Sigma f_{gi} = \mu_p \cdot \Sigma w_{pi} + \mu_g \cdot \Sigma w_{gi} = \mu_p \cdot W_p + \mu_g \cdot W_g \quad (3)$$

ここで、 F_t ：ポリシング抵抗、 f_{pi} , f_{gi} , F_p , F_g ：平坦部および空孔内の堆積した砥粒と基板との間に働くポリシング抵抗と総ポリシング抵抗、 μ_p , μ_g ：平坦部と空孔部における砥粒と基板の平均摩擦係数

ところで、一層ポリシャ寿命時において空孔部にある堆積した砥粒群は、溶媒が非常に少ない高粘性流体状態にあると考えられる。このため、堆積砥粒群の流動抵抗は、正常な状態のポリシング液に比較して大きくなり、ポリシング荷重が作用した場合、その一部を支持するようになる。しかし、液中にあるため、砥粒間での互いの拘束力はほとんど無いと考えられる。その結果、ポリシャ平坦部と砥粒との接触摩擦力のような砥粒保持力が生じず、砥粒と基板が接触しても、除去作用はほとんど行わず、摩擦係数 μ_g は極めて小さくなる。すなわち、砥粒の堆積した空孔部では、ポリシング荷重 W の内の W_g を支持するが、除去作用を行わず、(3)式の第2項はほぼ零とみなせる。除去を行うのは、定常過程と同様、ポリシャ平坦部である。このように考えると、定常過程においては、ポリシャ平坦部で全ポリシング荷重 W を支持するのに対して、寿命時には W の一部である W_p しか支持しない。この結果、寿命時には、個々の砥粒に作用するポリシング荷重が小さくなり、除去速度が大きく減少する。また、ポリシング抵抗についても、 $F_t = F_p = \mu_p \cdot W_p = \mu_p \cdot (W - W_g)$ となり、定常過程の場合の $F_t = \mu_p \cdot W$ に比較して大きく減少する。これに対して二層ポリシャでは、長時間の加工でも砥粒の堆積が生じにくく、安定した除去速度が得られ、ポリシング抵抗も一定の値となると考えられる。

以上、除去速度の変化について考察したが、今後検討を重ねて、その妥当性の有無を明確にしていく予定である。

図11は、二層ポリシャにおけるポリシング時間と終末表面粗さ $(Hra)t$ および終末微小うねり $(Hwa)t$ との関係を示す。なお、終末とは、基板をポリシングし、平滑度が向上した後、最終的にそれ以上向上せず、その後のポリシング過程では、同じ平滑度となる状態を意味する²⁾。図より、 $(Hra)t$ および $(Hwa)t$ は、初期過渡領域においては、除去速度の低下とともに減少し、定常過程になるまで小さくなる。前述のように、初期ポリシャ表面の突起状ナップ部や微小空孔が減少し、個々の砥粒の除去速度が小さくなる、言い換えれば、砥粒切込みが小さくなることが関係していると考えられる。その後、平滑度は、ポリシング時間1500分程度まで一定を維持するが、1500分を超えると、再び悪化する傾向が見られる。二層ポリシャの1500分以降では、図7(d)に示したように、ポリシャ表面の一部に底の浅い空孔が生じ、

Fig.11 Change of the terminal surface smoothness with polishing time

Fig.12 Influence of polishing pressure on the change of removal rate with polishing time

そこには砥粒の堆積が見られる。ポリシング荷重がかかると、この底の浅い空孔は圧縮される。その際、堆積砥粒群の溶媒部分は、空孔外に排出される。また、空孔はポリシャの壁状膜によって回りを囲まれた状態にあるので、砥粒群は互いに押し合う状態になり、砥粒間に摩擦力が発生する。この摩擦力が、ポリシャ平坦部における砥粒支持力と同様に働き、部分的に大きな砥粒切込みが発生する。推測の域をでないが、除去速度に大きな変化のないポリシング時間1500分以降で、平滑度の悪化が生じるのは、このような現象が発生するためと考えている。

4.2 除去速度に及ぼすポリシング圧力の影響

図12に、二層ポリシャを用い、ポリシング圧力 $P=60\text{kPa}$ 、ポリシング速度 $Va=1.5\text{m/s}$ の超高圧力・高速度の条件でポリシングした場合の除去速度の変化を示す。なお、図5に示した $P=10\text{kPa}$ 、 $Va=1.5\text{m/s}$ の場合の結果も比較のために示している。図よりわかるように、 $P=60\text{kPa}$ 、 $Va=1.5\text{m/s}$ でポリシングする場合にも、 $P=10\text{kPa}$ 、 $Va=1.5\text{m/s}$ の場合と同様に、ポリシング初期には除去速度が大きく、初期過渡過程でポリシング除去速度が減少した後、一定の除去速度を継続するようになる。この初期過渡領域終了時間は、 $P=10\text{kPa}$ の場合の方が幾分短くなる傾向が見られるが、どちらも100分から200分で定常過程に移行している。 $P=60\text{kPa}$ の場合、定常過程における除去速度は約 $0.22\mu\text{m/min}$ であり、 $P=10\text{kPa}$ の場合と比較して4倍以上の超高除去速度が得られる。

図13に、 $P=60\text{kPa}$ 、 $Va=1.5\text{m/s}$ でポリシングした場合のポリシング時間500分までのポリシャ表面の変化を示す。図より、ポリシング時間5分程度で、ポリシャ表面の突起状ナップ部が相当除去される。その後初期過渡課程が終わる100分以降では、摩耗平坦面が明確に見られるようになる。このことから、 $P=60\text{kPa}$ 、 $Va=1.5\text{m/s}$ の超高圧力・高速度ポリシング条件での初期過渡過程における除去速度の減少にも、ポリシャの摩耗平坦化が影響していると考えられる。また、その摩耗平坦部のポリシャ表面積に対する割合は、ポリシング初期よりも幾分大きくなる傾向が見られる。この摩耗平坦部には、コロイダルシリカ砥粒の堆積は見られず、 $P=10\text{kPa}$ 、 $Va=1.5\text{m/s}$ の高圧力・高速度ポリシングとは異なる。

Fig.13 Change of polisher surface with polishing time in ultra-high pressure polishing condition

[Polisher: Double layer type, Abrasive:SiO₂, Lg=20ml/min, P=60kPa, Va=1.5m/s]

Fig.14 Change of polisher section with polishing time in ultra-high pressure polishing condition

[Polisher: Double layer type, Abrasive:SiO₂, Lg=20ml/min, P=60kPa, Va=1.5m/s]

図 14 は、図 13 のポリシャ断面を観察したものである。図より、ポリシャの最表層は、ポリシング初期において平坦化され、厚みが減少している。また、大空孔のある下層では、ポリシング圧力によって、巨視的変形をする傾向が見られる。しかし、一層ポリシャで $P=10\text{kPa}$, $Va=1.5\text{m/s}$ の条件でポリシングした場合に見られたように空孔が砥粒で埋め尽くされることはない。また、同図(d)のポリシング時間 500 分は、二層ポリシャで $P=10\text{kPa}$, $Va=1.5\text{m/s}$ のポリシング条件で 2000 分ポリシングした場合の除去厚さに相当するが、ポリシャ下層の空孔には、ほとんど砥粒が堆積していない。以上のようなことから、二層ポリシャでは、高速度・高圧力から超高圧力・高速度ポリシング条件まで、砥粒の埋め尽くしによって生じるポリシャ寿命は発生しないと言える。発生すると考えられるのは、二層構造の表層がポリシングにより摩耗して消失し、下層が露出して、一層構造になるときである。ただし、超高圧力ポリシングでは、前報¹⁾で示したように、一層ポリシャでも砥粒の堆積は生じにくい。このため、除去速度の観点からのポリシャ寿命を判断するのは難しいと思われる。

図 15 は、 $P=60\text{kPa}$, $Va=1.5\text{m/s}$ の超高圧力・高速度ポリシングを行った場合の基板表面の平滑度を、ポリシング時間 10 分と 500 分の場合で比較したものである。図よりわかるように、どちらのポリシング時間においても三次元測定表面粗さで約 0.4nm(Ra) 程度、微小うねりで約 0.45nm(Ra) 程度となっており、ポリシング過程での表面平滑度の変化はほとんど見られない。また、得られた仕上面は高圧力・高速度の条件で得られた表面とほぼ同等のものであり、超高圧力・高速度ポリシングにおい

Fig.15 Influence of ultra-high polishing pressure on surface smoothness of polished substrate

[Polisher: Double layer type, Abrasive:SiO₂, Lg=20ml/min, P=60kPa, Va=1.5m/s]

ても十分な高平滑のポリシングが行えることが確認できた。

以上のようなことから、二層ポリシャを用いた場合にも超高圧力・高速度ポリシング法は、高能率超平滑ポリシング法として有用であると考えられる。

5. ま と め

超高圧力・高速度条件によるアルミタイプ磁気ディスク基板のポリシング加工において、除去速度の変化に及ぼすポリシャ表面構造の影響を検討した。ポリシャは、表面ナップ層が二層構造のものと、前報の一層構造のものを使用した。用いた砥粒はコロイダルシリカである。以下に主な結果を示す。

- (1) 超高除去速度ポリシングでは、ポリシャ表面温度が高くなり、ポリシャ表面の損傷を招くが、定盤水冷法により、温度上昇を抑制でき、安定した加工が可能となる。
- (2) 二層ポリシャでは、一層ポリシャで見られたような比較的短いポリシング時間までに生じる 4 段階の除去速度変化は見られず、初期過渡過程と極めて長時間の定常過程が見られた。
- (3) 二層ポリシャは、一層ポリシャよりも、下層の大空孔部でのコロイダルシリカの堆積が起こり難い構造である。
- (4) 二層ポリシャを用い、ポリシング速度 1.5m/s において、ポリシング圧力 60kPa で加工を行うと、ポリシング圧力 10kPa の場合よりも、除去速度は約 4 倍に大きく増加する。
- (5) 二層ポリシャを用いた超高圧力・高速度ポリシングにおいても、既存の圧力・速度条件で加工したものと同程度の十分な高平滑面を得ることが出来る。

本研究を行うにあたって、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板(株)、フジボウ愛媛(株)、(株)花王に謝意を表する。なお、本研究の一部は、平成 17 年度・平成 18 年度科学研究費補助金(基盤研究(B): 08650149)によって行った。

参 考 文 献

- 1) 安井平司, 山口寛太, 松川誠治, 山崎 稯: アルミ磁気ディスク基板の超高圧力・超高速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, **73**, 1 (2007) 107.
- 2) 安井平司, 佐藤 郁, 松永竜二, 小林 深: アルミナ砥粒による磁気ディスク基板の高平滑ポリシングに関する研究(第1報), 精密工学会誌, **60**, 1 (1994) 128.
- 3) 安井平司, 山口寛太, 栗林将司: 新概念高能率超平滑ポリシング盤の開発(第1報), 精密工学会誌, **73**, 12 (2007) 1325.
- 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) - 除去速度と平滑度に及ぼすポリシング圧力の影響 -, 精密工学会誌, **70**, 9 (2004) 1206.