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2報）*

— 除去速度と微小うねりに及ぼすポリシング条件の影響 —

安井平司** 佐藤 郁*** 松永竜二*** 鈴木幸雄***

Studies on High Flatness Polishing of Magnetic Disk Substrate with Al_2O_3 Abrasives (2nd Report)
— Influence of Polishing Conditions on Removal Rate and Slight Undulation —

Heiji YASUI, Kaoru SATO, Ryuji MATSUNAGA and Yukio SUZUKI

This report aims to clear experimentally the influence of polishing pressure, polishing speed and the content of Al_2O_3 abrasives included in polishing fluid on the removal rate and the slight undulation of the NiP plated magnetic disk substrate. The substrate surface is examined by measuring the slight undulation and the surface roughness, which are measured on the substrate surface of 4 mm length with WYKO and 50 μm length with Talystep, respectively. The polishing experiments are carried out with a marketing machine with some reconstructions. In case of the soft type polisher, the removal rate increases with the increases of polishing pressure, polishing speed and the content of Al_2O_3 abrasives. The terminal surface roughness becomes better for lower polishing pressure. Polishing speed and the content of Al_2O_3 abrasives have little influence on the terminal surface roughness. The terminal slight undulation becomes better for lower polishing pressure and the less content of Al_2O_3 abrasives, and is little influenced by polishing speed. In case of the hard type polisher, on the other hand, the removal rate increases little or decreases with the increase of polishing speed over a critical polishing speed at low pressure because the floating force of polishing fluid decreases the actual polishing pressure. The relationship between the polishing conditions and the slight undulation for the hard type polisher, however, is similar to the soft type polisher. The best slight undulation obtained in the experiment is about 4 nm (P-V value).

Key words: magnetic disk substrate, polishing, high flatness, optimum polishing condition, polishing pressure, polishing speed, polisher, alumina abrasives

1. はじめに

前報¹⁾では、 Al_2O_3 砥粒で NiP 無電解めっき型磁気ディスク基板の微小うねりを数 nm オーダに最適にポリシングする方法の確立を目指し、まずポリシング後の基板表面を高精度表面形状測定機 (WYKO, Talystep および NanoScope III (AFM) 等) で詳細に調べ、 Al_2O_3 砥粒による数 nm オーダのポリシング除去機構を検討した。また、ポリシング特性に及ぼすポリシャの種類の影響を概括的に調べた。その結果、アルミナ砥粒を用いて数 nm オーダの高平滑面を形成するポリシング除去機構が砥粒表面上の非常に微小かつ鋭利な切れ刃による切削機構であることを明確にした。また、ポリシャ硬度を高くすると除去速度は高くなるが、最終的に到達できる終末微小うねりは大きくなることを示した。

本報では、引き続き、ポリシング特性 (除去速度、平滑化速度および到達微小うねり等) に及ぼすポリシング条件 (ポリシャの種類、ポリシング圧力、ポリシング相対速度、砥粒濃度等) の影響を実験的に検討し、考察したので、以下に報告する。

2. 実験方法および条件

図 1 に本実験で使用したポリシング装置の模式図を示す。市販のラップ盤に磁気ディスク基板の保持機能と回転機能および基板への加圧機能を付加した構造となっている。実験装置周辺

の環境は、クラス 300 に対応する¹⁾。

表 1 に本実験で用いた主な条件を示す。ポリシャ A, B, C はいわゆる軟質のもので、D は硬質のものである。ポリシング平均相対速度 V_a (以下、平均相対速度と略記する) は、基板上の任意半径位置での相対速度 V_r (図 2・式 (1)) を基板 1 回転にわたって積分し、それを積分長さで除して求めた。

Fig. 1 Schematic view of the polishing machine

Table 1 Experimental conditions

Workpiece	NiP plated magnetic disk substrate
Polisher	Non-woven urethanfoam (type : hardness) (A : 22°), (B : 44°), (C : 65°), (D : 80°)
Polishing fluid	Abrasives : Al_2O_3 (ϕ 0.5 μm), Content of abrasives C_g : 1.1-10.5 wt% Supply flux S_g : 6 mg/s
Polishing condition	Pressure P : 1.8-11.1 kPa Speed V_a : 0.3-1.8 m/s

* 原稿受付 平成 6 年 1 月 31 日

** 正 会 員 熊本大学工学部 (熊本市黒髪 2-39-1)

*** 学生会員 熊本大学大学院

Fig. 2 Illustration of polishing

Fig. 3 Relationship between the average relative polishing speed and the disk rotation speed

$$V_r = \sqrt{r^2 \cdot \omega_r^2 + X^2 \cdot \omega_R^2 + 2 \cdot r \cdot \omega_r \cdot \omega_R \cdot \xi} \quad (1)$$

ここで、 $X = R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cos(\phi)$ 、 $\xi = R \cos(\phi) - r$ 、 R ：定盤中心から基板中心までの距離、 r ：切削点の基板半径位置、 ω_R ：定盤角速度 ($2\pi N/60$)、 ϕ ：基板の回転角、 ω_r ：基板角速度 ($2\pi n/60$)。

図3は、切削点の位置が $R=96$ mm、 $r=30$ mm の V_a を式(1)を用い、定盤回転数 N を変えて求めたものである。図よりわかるように、相対速度 V_r は基板の回転角 ϕ により変化するが、 N が同じ場合には基板回転数 n が変化しても V_a は一定であることがわかる。なお、基板の中心までの距離 R が一定ならば、 r が変化しても V_a は同じで、 V_a が R における定盤回転速度に一致することは容易に推察されよう。

使用した磁気ディスク基板は、3.5 インチタイプ（直径 96 mm、厚さ 1.27 mm）である。磁気ディスク基板の表面形状は、前報同様、比較的大きな面積（測定機 WYKO、測定長 4 mm；以下、PV 値を微小うねり H_w と記す）と微小面積（測定機 Talystep [触針 $0.1 \times 2.5 \mu\text{m}$]、測定長 $50 \mu\text{m}$ ；以下、PV 値を表面粗さ H_s と記す）について調べた。測定は一条件に対して 4 基板、各基板当たり 5 か所、計 20 点行い、その平均値を結果として示した。なお、前報同様、WYKO の測定では彎曲補正を行っている。ポリッシング除去量の測定法および除去厚さの求め方も前報と同様である。ポリッシング液中の砥粒粒径分布は、SALD 1100（島津製作所製）で測定した。

Fig. 4 Influence of polishing pressure on the removal rate for four kinds of polishers

3. ポリッシング特性

3.1 ポリッシング圧力の影響

図4に、各種硬度のポリシャを用いた場合のポリッシング圧力 P （以下、圧力と略記する）と単位時間当たりの除去速度 K の関係を示す。なお、平均相対速度 V_a は、1.5 m/s、砥粒濃度 C_g は、5.0% を用いた。図よりわかるように、各ポリシャの場合とも P の増加に伴って、 K は増加するが、 P の増加に対する K の増加率 $\alpha (=dK/dP)$ は減少する傾向が見られる。また、同じ P でもポリシャの硬度が高くなると、 K が大きくなる。なお、単位時間、単位圧力当たりの除去率 K^* はポリシャの種類が同じであればそれほど大きな変化をしないことは、前報で示した通りである。

このような K に及ぼす P の影響を、前報で示した Al_2O_3 砥粒による基板の除去機構を考慮に入れて基礎的に検討してみる。前報で示したように、基板が、 Al_2O_3 砥粒の切れ刃による極く微小切削で除去され、 K が下記、式(2)で表されるものとする。

$$K = 0.25 h^2 \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot V_a \cdot n_g \quad (2)$$

ここで、 h ：切削砥粒切れ刃除去深さ、 V_a ：平均相対速度、 n_g ：単位面積当たりの切削切れ刃数、 θ ：切れ刃頂角。

K には、個々の切削砥粒切れ刃による除去深さ h が大きく関係する。この h には、前報で検討したように、切れ刃による切削で基板に固有に形成される終末表面粗さ $(H_s)_t$ が密接な関係をもつと考えられるので、 $(H_s)_t$ に及ぼす P の影響を調べてみた。

図5は、図4の最大と最小の圧力である $P=11.1$ kPa と $P=3.7$ kPa における $(H_s)_t$ を各種硬度のポリシャで比較して示したものである。図よりわかるように、 $(H_s)_t$ は、ポリシャ硬度 Z_p が増加するとともに前報で示したように大きくなる。また、 $(H_s)_t$ に及ぼす P の影響については、まず、軟質ポリシャ A, B, C では、 P が 3.7 kPa から 11.1 kPa に3倍増加すると、 $(H_s)_t$ は、それぞれ 20%, 50%, 10% 程度増加する。 $(H_s)_t$ のこの程度の増加では、式(2)の h と K の関係から、図4での同じ P の変化による K の増加が2倍から3倍になるのを説明することは難しい。つまり、この K の増加には、 P の増加による h 以外の影響も考える必要があると思われる。その因子としては、図4の実験では、式(2)における切れ刃頂角 θ や V_a は同じであると考えられるため、単位面積当たりの切削切れ刃数 n_g の増加の影響が考えられる。この n_g の増加

Fig. 5 Influence of polishing pressure on the terminal surface roughness for four kinds of polishers

Fig. 7 Change of the slight undulation with the removal depth for the polishing pressures of 3.7 kPa and 11.1 kPa

Fig. 6 Comparison of the substrate surfaces polished by 3.7 kPa and 11.1 kPa with polisher, "D"

機構としては、 P の増加によるポリシャの変形で、ポリシャの最表面層よりも内部にあった砥粒切れ刃が、ポリシャ最表面へと新たに顕出してくるためと考えらる。

次に、硬質ポリシャDの $(H_s)_t$ をみると、軟質の場合とは逆に、低圧力の3.7 kPaの方が、高圧力の11.1 kPaよりも大きくなっている。これは、図4に示したように、11.1 kPaの K の方が約3倍程度高くなることからすると、除去機構を考える上で問題となる結果である。そこで、両圧力での基板表面粗さ曲線を再検討するとともに、基板表面の微分干渉顕微鏡観察を行った。図6は、その結果の一例である。図の表面粗さ曲線からわかるように、3.7 kPaの場合に急峻で深い溝（○印）が幾つか見られるが、総体的には、図5での3.7 kPaと11.1 kPaに見られるような $(H_s)_t$ の明確な差はない。また、3.7 kPaの場合に見られる深い溝は、観察写真から見ると基板表面に多数形成されているスクラッチ痕に対応すると考えられる。図5の点線で示す結果は、コンピュータ処理により、20計測点の表面粗さ曲線におけるスクラッチ痕の部分を除いて求めた平均値であるが、その場合には、3.7 kPaの $(H_s)_t$ は、11.1 kPaの場合よりも幾分か小さくなる。この結果より、図5で3.7 kPaの場合の方が、11.1 kPaよりも $(H_s)_t$ が大きくなるのは、スクラッチ痕の影響であると考えられる。低圧力 $P=3.7$ kPaでのスクラッチ痕の発生機構は、前述の軟質ポリシャで考えたポリシャ表面の変形という観点からすると、 P が低くなると、砥粒がポリシャ最表面より内部へ退くことにな

るので、それとは異なる機構と考えられる。その機構としては、この場合のような比較的 P が低い条件では、後の図9でも言及するように、ポリッシング液の浮力に起因する圧力減少の影響が大きいと、基板とポリシャとの間隙が相対的に大きく増加して、間隙に大きな砥粒切れ刃が入りやすくなり、結果的に大きなスクラッチ痕が形成されるようなことが考えられる。このことからすれば、ポリシャDでは、基板が浮き上がりやすく、それを防止するためには、ある程度の圧力が必要と考えられる。

このように、スクラッチの影響を除くと、ポリシャDの場合の $(H_s)_t$ も、軟質ポリシャと同様、 P が増加すれば基本的には幾分かの $(H_s)_t$ の増加が起ると考えられる。なお、図は省略するが、図5で示した $V=1.5$ m/sの場合より浮力の影響の少ないと思われる $V=0.3$ m/sの場合、 $P=3.7$ kPaと11.1 kPaの $(H_s)_t$ は、それぞれ35 nmと41 nmになり、3.7 kPaの方が明確に小さくなったことを付言する。しかし、この P の増加による $(H_s)_t$ の増加は、図4の K の増加と比較して、軟質ポリシャの場合と同様に小さい。したがって、ポリシャDの場合にも、 P の増加によるポリシャ表面の変形や砥粒保持機能の向上による n_g の増加があり、それが K の増加に影響しているものと考えられる。

図7に、 $P=3.7$ kPaと $P=11.1$ kPaの場合の除去厚さ T_p と微小うねり H_w との関係を比較して示す。ポリシャはAを用いている。図より、前報でも同様の結果を示したように、 H_w はある T_p までは、 T_p が増加するとともに過渡的に減少するが、それを越えると終末のはぼ一定値（以下、終末微小うねり $(H_w)_t$ と記す）になることがわかる。また、同一 T_p では、低圧力の方が高圧力の場合よりも過渡過程中的 H_w および終末過程の $(H_w)_t$ ともに小さく、低圧力の方がより良い平滑面になることがわかる。とくに、 T_p が小さい段階での差が大きく、例えば $T_p=0.2$ μmにおいて高圧力では $H_w=46$ nmであるのに、低圧力では $H_w=27$ nmであり、20 nm程度の大きな差が見られる。しかし、平滑化能率を時間的に考えた場合（ポリッシング時間 t と H_w の関係）の結果は、図4の高圧力の方が除去速度が大きく短時間に加工が進む点を考慮すると、図7の結果とは、必ずしも同じになるとは言えない。そこで、 t と H_w との関係を調べたところ、図は省略するが、図7の T_p と H_w の関係とは多少異なり、ポリッシングの全過程を通じて、低圧力と高圧力の H_w の差は比較的小さく、図7の $(H_w)_t$ の差程度であった。同様の傾向は、他のポリシャの場合にも確認された。

図8に各種硬度のポリシャの $(H_w)_t$ に及ぼす P の影響を示

Fig. 8 Influence of the polishing pressure on the terminal slight undulation for four kinds of polishers

Fig. 9 Influence of polishing speed on the removal rate

す。図より、 Z_p の増加とともに $(H_w)_t$ が増加する。また、総体的に11.1 kPaの方が、3.7 kPaよりも $(H_w)_t$ が幾分か大きくなり、悪い平滑度となる傾向を示すのがわかる。

以上のことから、ポリッシング圧力が高い方が除去速度が大きくなり、表面粗さは悪くなる。また、微小うねりに関しては多少悪くなる程度と考えられる。なお、浮き上がりやすい硬質ポリシャでは、圧力が低い場合、スクラッチが発生しやすいので、高平滑ポリッシングには適していないように思われる。このようなことから、ポリッシング圧力の決定には、所要除去厚さと平滑度の程度および、本報では検討しなかったが、高圧力の方がポリシャ損耗の程度が大きく、寿命が短くなること等を考慮して、行う必要があると思われる。

3.2 ポリッシング平均相対速度の影響

図9は、各種硬度のポリシャの除去速度 K に及ぼす平均相対速度 V_a の影響を調べたものである。なお、圧力 P は平滑度が良くなる低圧力の3.7 kPaを用いている。また、ポリシャDでは、圧力を1.8 kPaとさらに小さくした場合についても示した。圧力が $P=3.7$ kPaの場合、軟質ポリシャA, B, Cでは、 V_a が増加するとともに K がほぼ直線的に増加し、 $V_a=0.3$ m/sから1.8 m/sに6倍増加すると、 K は約4倍増加するのがわかる。これに対して、硬質ポリシャDの場合には、ある V_a までは V_a の増加とともに K も増加するが、その後、

Fig. 10 Influence of polishing speed on the terminal surface roughness

増加率 $\beta (=dK/dV_a)$ は、 V_a の増加とともに減少する。そして、ある V_a を越えると K はほとんど増加しなくなるような傾向を示す。このような傾向は、 $P=3.7$ kPaよりさらに圧力が低い $P=1.8$ kPaの場合に、より顕著に現れ、 V_a がある程度以上高くなると K が逆に減少し、除去速度が限界となる臨界平均相対速度 $(V_a)_{cr}$ が存在するような結果を示すことがわかる。なお、ポリシャDでも、高圧力の $P=11.1$ kPaでは、 $P=3.7$ kPaの場合より、より高い V_a まで、 K は V_a に対して直線的な増加傾向を示したことを付言する。

図10に各種硬度のポリシャの終末表面粗さ $(H_s)_t$ に及ぼす V_a の影響を示す。圧力は $P=3.7$ kPaである。図より軟質ポリシャでは、 $(H_s)_t$ は V_a が増加してもほとんど変化しないことがわかる。一方、硬質ポリシャDの場合、 $V_a=1.5$ m/sの $(H_s)_t$ は、図5で述べたように、スクラッチの部分を除くすれば二十数 nm になり（図中に点線で表示）、 $V_a=0.3$ m/sの場合に比較して実質的には減少する。この結果からすると、軟質ポリシャの場合には、 V_a は切削砥粒切れ刃除去深さ h に、ほとんど影響しないと考えられる。したがって、図9の K が V_a にほぼ比例的関係で増加するのは、式(2)より、単に V_a の増加と直接的な関係があるためと考えられる。

これに対し、硬質ポリシャDの場合には、 V_a が増加すると図のように実質的には $(H_s)_t$ が減少するので、 V_a は h に影響し、その結果が K にも影響を与えていると考えられる。しかし、 V_a が0.3 m/sから1.5 m/sに5倍増加しても、 $(H_s)_t$ はたかだか30%程度しか減少していないことから、 K の変化には、式(2)から考えられる V_a の直接的影響以外の影響も考慮する必要があると思われる。他の影響としては、前述の K に対する P の影響で検討したのと同様に、単位面積当たりの切削切れ刃数 n_g の変化の影響が考えられる。 V_a の変化に伴う n_g の変化は、 V_a の変化によるポリッシング液の浮力の変化で、実質的圧力や基板とポリシャとの間隙が変化し、それらが、ポリシャ表面の変形量や砥粒保持機能に影響するために生じることが考えられる。この考察は、図9でより浮力の影響を受けやすい、より低圧力の $P=1.8$ kPaでは、 V_a が $(V_a)_{cr}$ を越えると K が減少し始めることから妥当と考えられる。

以上の結果から、 K に及ぼす V_a の影響は、 V_a が増加すると、ポリシャに浮力が作用し、実際のポリッシング圧力が減少する。このため、基本的には、式(2)における h や n_g の減少につながると思われる。しかし、軟質ポリシャの場合には、その影響は V_a の増加に比較してほとんどなく、 K は図9のように V_a の増加とともに直線的に増加する。これに対して、硬質のポリシャDの場合には、 V_a の増加による浮力の影響を受け

Fig. 11 Influence of polishing speed on slight undulation for the polisher, A

Fig. 12 Influence of the content of abrasives on the removal rate

やすいため、 n_g の減少が大きく、 K は V_a とともにその増加率 β が減少するものと考えられる。

図11は、微小うねり H_w に及ぼす相対速度 V_a の影響を検討したものである。ポリシング条件は、図8の結果から H_w が良くなるポリシャAと $P=3.7$ kPaを用い、 V_a は0.3 m/sと1.5 m/sと比較している。図より、除去厚さ T_p が増加するとともに、 H_w は両方の V_a の場合とも同じように減少していき、 $(H_w)_t$ もほぼ同じになるのがわかる。このような結果は、その過程に多少の変化があるものの他のポリシャでも同様に得られた。それゆえ、 V_a は $(H_w)_t$ にほとんど影響しないと考えられる。

3.3 砥粒濃度の影響

図12は、除去速度 K に及ぼす砥粒濃度 C_g の影響を調べたものである。なお、この実験では、予備ポリシングによる前加工で、 H_w を約14 nm程度まで平滑化した基板を用いた。ポリシング条件は、前述の結果から良い $(H_w)_t$ を形成することができたポリシャA、 $P=3.7$ kPa、 $V_a=1.5$ m/sを用いた。また、 C_g は1.1~10.5%まで変化させている。なお、 C_g をこれ以上高くした場合には、砥粒分散を一様にするのが難しく、再現性の高い結果が得られなかった。図より、 C_g が増えるに従って K もほぼ直線的に増加しているのがわかる。

図13に終末表面粗さ $(H_s)_t$ に及ぼす C_g の影響を示す。ポリシング条件は図12と同じである。図より、 $(H_s)_t$ は C_g が増加しても幾分か悪くなる程度である。このように、 C_g によって $(H_s)_t$ があまり変化しないことから推測すると、 C_g は h に大きな影響を及ぼさない因子であると考えられる。したがって、図12で C_g の増加に比例して K が増加するのは、式(2)から、 C_g の増加に比例して単位面積当たりの切削切れ刃数 n_g

Fig. 13 Influence of the content of abrasives on the surface roughness

Fig. 14 Influence of the content of abrasives on the slight undulation

が単に増加するためと考えられる。なお、圧力一定で n_g が増加しても $(H_s)_t$ の変化が少ない（すなわち、 h の変化が少ない）のは、 C_g の増加によって生じた新たな切削切れ刃の保持される場所が、 C_g が少ない場合にポリシャと基板が直接接触していた場所で、基板との接触が、ポリシャから切れ刃に置き換わるだけで、個々の切れ刃に作用する力の変化が大きくなりえないためと考えられる。

図14は、ポリシング過程における微小うねり H_w の変化に及ぼす C_g の影響を調べたものである。ポリシング条件は、図12と同じである。図より、低砥粒濃度の $C_g=1.1\%$ と $C_g=2.3\%$ では、同一 T_p における H_w は、 $(H_w)_t$ も含めてほとんど同じで、平滑化過程に大きな変化はみられない。これと比較して、砥粒濃度が高い $C_g=6.3\%$ や 10.5% の場合では、 H_w や $(H_w)_t$ が、ともに低濃度の場合に比べて大きくなるのがわかる。

図15は、 $(H_w)_t$ に及ぼす C_g の影響を検討したものである。図よりわかるように、 C_g が2%を越える程度までは、 $(H_w)_t$ は約4 nmではほぼ一定である。しかし、それを越えると $C_g=6\%$ 程度まで、 C_g の増加とともに $(H_w)_t$ は大きくなり、約6 nmまで悪化する。そして、 C_g がさらに増えても $(H_w)_t$ の悪化は非常に緩やかで、ほとんど変化しなくなる。このように、 C_g によって $(H_w)_t$ に約2 nmの差が出ており、低濃度の方が、高濃度の場合よりも到達平滑度が高くなるのがわかる。 $(H_w)_t$ に及ぼすこのような C_g の影響については、前報で示したように、砥粒濃度によるポリシャ表面特性の変化が関係しているのではないかと考えている。

以上、本研究の範囲内では、硬度の最も低い軟質ポリシャAで平滑度が最も良くなり、低圧力と低砥粒濃度を用いると、

Fig. 15 Influence of the content of abrasives on the terminal slight undulation

$(H_w)_t$ を 4 nm 程度にまでし得ることがわかった。これらのポリッシング条件は、 Al_2O_3 砥粒を用いて数 nm の高平滑ポリッシングを実施する際の重要な留意点と考えられる。

4. ま と め

Al_2O_3 砥粒による磁気ディスク基板の高平滑ポリッシング特性（除去速度、平滑化速度および到達微小うねり等）に及ぼすポリッシング条件（ポリシャの種類、ポリッシング圧力、平均相対速度、砥粒濃度等）の影響を実験的に検討し、考察した。主な結

果をまとめると以下のようになる。

- 1) 軟質ポリシャの方が硬質ポリシャより微小うねりと表面粗さともに良いが、除去速度は低くなる。
- 2) 軟質ポリシャでは、
 - (1) 除去速度は、ポリシャ硬度、ポリッシング圧力、平均相対速度および砥粒濃度を増加すると増加する。
 - (2) 表面粗さは、高ポリッシング圧力にすると悪くなるが、平均相対速度や砥粒濃度の影響は比較的受けにくい。
 - (3) 微小うねりは、低ポリッシング圧力、低砥粒濃度で良くなり、平均相対速度にはほとんど影響されない。
- 3) 硬質ポリシャでは、
 - (1) 平均相対速度が増加すると、除去速度の増加率は減少する。特に、低ポリッシング圧力では、ある臨界平均相対速度以上では、除去速度が減少する。
 - (2) 低ポリッシング圧力、高平均相対速度では、スクラッチが発生し、表面粗さが悪くなる。
- 4) ポリシャ A を用い、 $P=3.7$ kPa, $V_a=1.5$ m/s, $C_g=1.1\sim 2.3\%$ のポリッシング条件で、約 4 nm の終末微小うねりが得られた。

参 考 文 献

- 1) 安井平司, 佐藤 郁, 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ッシングに関する研究（第1報）, 精密工学会誌, 60, 1 (1994) 128.