磁性流体を研磨液として用いた平面ラッピング*

梅原 徳次^{*1}, 青柳 英樹^{*2}, 下村 彰^{*3}

Lapping of Glass Plate with Magnetic Fluid and Magnetic Field

Noritsugu UMEHARA^{*4}, Hideki AOYAGI and Akira SHIMOMURA^{**}Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Smooth and flat surface of glass plates should be needed for the HDD substrate. Polishing with free abrasives made smooth surface, however it is difficult to obtain flat surface because of the non-uniform distribution of free abrasives. In order to overcome such issue, we tried to apply magnetic force with magnetic fluid and magnetic field for uniform distribution of abrasives during polishing process. By applying 20 mT of normal magnetic field to the copper polishing plate with magnetic fluid as polishing liquid, surface roughness of polished glass plate improved by 20-60%. And flatness of polished glass decreased to half with magnetic fluid and magnetic field.

Key Words: Lapping, Glass Plate, Magnetic Field, Magnetic Fluid

1. 緒 言

最近, 半導体や磁気記憶装置の分野で, 優れた表面粗さと平面度を兼ね備えた平面創成法が求められている。均一に研磨するために, Preston の式に従って, 相手面との間の面圧とすべり速度が制御されているが, 完全な平面を得るのは困難である。その原因として, 研磨時の砥粒の分布が不均一であること, 及び切り屑の排出が良好に行われなことが考えられる。そのような研磨時の砥粒の分布を制御する方法として, 磁性流体を研磨液として利用する方法が考えられる。磁性流体の研磨への応用は, 磁性流体中の非磁性体である砥粒の磁気排出力を利用して, 今中・黒部ら¹⁾により始められ, 谷ら²⁾により発展した。その後, 磁気排出力を用いた研磨法は, 梅原らによりセラミックス球^{3, 4)}, 金属円筒端面⁵⁾, 金属円筒面⁶⁾及びセラミックス円筒⁷⁾に試みられた。さらに, 梅原らは, 磁性流体中の非磁性砥粒に作用する相互作用力を利用することで, 磁場による砥粒の凝集制御が可能である事に着目し, 局所領域の研磨を行い, その効果を実証している⁸⁾。このような磁性流体と磁場による磁気分散効果が, もし比較的広い面の平面ラッピン

グにおいても実現すれば, 研磨時に垂直磁場を印加することで, 砥粒がラップ上に均一分散し, それにより面ダレの少ない平面度に優れた平面を得ることが考えられる。そこで, 本研究では, 研磨面に垂直磁場が印加可能な平面ラップ盤を改造・試作し, 砥粒を含む磁性流体を研磨液としたガラス平面ラッピング研磨の基礎実験を行い, 表面粗さと平面度に及ぼす磁場の影響を明らかにした。

2. 研磨特性向上の原理

図 1 (a) に一般の遊離砥粒によるラッピングにおける砥粒分布の模式図を示す。砥粒は不均一に分布し一部凝集体を生成すると思われる。一方, 磁性流体中に非磁性砥粒を混合し, 薄膜状にして垂直磁場を印加すると, 図 1 (b) のように非磁性粒子は互いに斥力を及ぼし合い, 三角格子を形成し, 規則正しく分布する。粒子間の距離に及ぼす磁場強度並びに他の因子の影響を明らかにするため粒子分散の 1 次元モデルを考える。非磁性粒子同士の斥力 f_r を求める式は(1)のように表される⁹⁾。

$$f_r = \frac{3m^2}{4\pi\mu_f} \cdot \frac{1}{r^4}$$

$$m = \frac{-3(\mu_f - \mu_0)\mu_f}{2\mu_f + \mu_0} \cdot H \cdot \left(\frac{4\pi}{3} a^3 \right) \quad (1)$$

$$H = \frac{\mu_0}{\mu_f} \cdot H$$

* 原稿受付 2009 年 3 月 17 日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学研究科(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。^{*2} (株) 本田技研研究所(〒351-0024 朝霧市泉水 3-15-1)。^{*3} 日の本研磨材(株)(〒130-0021 東京都墨田区緑 3-13-7)。

E-mail: ume@mech.nagoya-u.ac.jp

Fig. 1 Model of magnetic force to non-magnetic particles in magnetic fluid

Fig. 3 Photograph of lapping machine

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 μ_f は磁性流体の透磁率、 m は磁性粒子の磁気モーメント、 H' は内部磁界、 H は外部磁場の磁場強度、 a は非磁性粒子の半径、 r は非磁性粒子間の距離である。

一方、磁場勾配を有する磁場中では、磁性流体中の個々の粒子には(2)式の磁気排出力が作用する¹⁰⁾。

$$F = \mu_0 \cdot \bar{M} \cdot \nabla H \cdot V \quad (2)$$

ここで V は非磁性粒子の体積、 $\bar{M}$ は磁性流体の平均磁化、 ∇H は磁場勾配である。

この二つの力による釣り合いの位置に砥粒が分散すると仮定する。本研究で用いる電磁石は対称形なので、鉄心の中心から半径方向のみを検討する。そこで、1次元の粒子分散モデルを図2のように仮定する。なお、粒子間の斥力は粒子間距離の増加に伴って著しく減少するため隣り合った粒子以外の粒子からの斥力は無視する。また、ラップ盤の回転に伴う遠心力も無視する。

Fig. 2 Model of magnetic force to non-magnetic particles in magnetic fluid

Fig. 4 Magnetic field strength on the lapping plate

図2において、コアの中心から半径方向に3個の非磁性粒子が存在していると仮定する。最も中心にある粒子にかかる力は、コアの中心を挟んで反対側に存在している粒子との斥力 fr_1 と、半径方向側にある粒子との斥力 fr_2 、そして磁場勾配により生じる力 F_1 である。これらを力の釣り合いの式で書くと(3)式のようになる。

$$fr_1 = F_1 + fr_2 \quad (3)$$

同様に中心から2番目の粒子も fr_2 , fr_3 , F_2 の力がかかっている。また、中心から3番目の粒子には2番目の粒子との斥力 fr_2 と磁場勾配による力 F_3 がかかっている。これらを式で表すと(4), (5)式のようになる。

$$fr_2 = F_2 + fr_3 \quad (4)$$

$$fr_3 = F_3 \quad (5)$$

(5)式を(4)式に代入し、それによって得られた(6)式を(3)式に代入することにより、以下のような(7)式を得る。

$$fr_2 = F_2 + F_3 \quad (6)$$

$$fr_1 = F_1 + F_2 + F_3 \quad (7)$$

よって、(3), (4)式は(6), (7)式のような形になり、

Table 1 Surface profiles after lapping with 30 min with and without magnetic filed

	Without magnetic field	With magnetic field
#1000 ($d=11.5 \mu\text{m}$) W=30N		
#3000 ($d=4.0 \mu\text{m}$) W=30N		
#10000 ($d=0.6 \mu\text{m}$) W=30N		

粒子数が3個の場合の力のつり合い式を得たことになる。磁場勾配による粒子の排出力と2つの粒子の斥力の釣り合いから粒子間距離が推定可能である。半径 $2\mu\text{m}$ の粒子の粒子間の距離を試算する。磁性流体の飽和磁化、ラップ盤上の磁場の強さと半径方向の磁場勾配として、 $\bar{M} = 5670\text{A/m}^2$, $H = 13888\text{A/m}$, $\nabla H = 5670\text{A/m}$ を用い磁性流体の磁化曲線を仮定し計算した。その結果、鉄心中央部直上における非磁性粒子間の距離 r は $10.4\mu\text{m}$ となった。

3. 実験方法

3.1 垂直磁場印加型ラップ盤 ラップ盤上で磁場を印加するラッピング装置を試作した。ラッピング装置は秀和工業社製 SW-60 を改造したものであり、銅製のラップ盤を用いた。図3に装置の写真を示す。この装置はラップ盤を回転させて試験片の研磨を行う本体、試験片を保持して荷重をかけながらラップ盤に対して水平方向に揺動させ、試験片を回転させる揺動回転軸、ラップ盤上の研磨領域において垂直な磁場を発生させる電磁石によって構成されている。電磁石はラップ盤直下に設置した。

3.2 ラップ盤上の磁場強度分布 図4に研磨領域における垂直方向の磁場強度分布を示す。測定位置は図3のA-B間である。X=0はA-Bの中点の位置を示す。各コイル電流値における最大磁場強度は3Aで7.0mT, 6Aで11.7mT及び10Aで17.5mTであった。

Fig.5 Effect of magnetic field on surface roughness with different abrasive size

Fig.6 Effect of magnetic field on flatness with different abrasive size

Fig.7 Effect of magnetic field on surface roughness with different magnetic strength

Fig.8 Effect of magnetic field on flatness with different magnetic strength

Fig.9 Effect of magnetic field on surface roughness with different load

Fig.10 Effect of magnetic field on flatness with different load

3.3 実験手順及び実験方法 試験片にはソーダ石灰ガラスを用い、ホルダに貼り付け、片面のみのラッピングを行う。また、試験片を取り付ける揺動回転軸は図3中の矢印方向に揺動させる。試験片の直径は約66mm、厚さは約1mmである。研磨前の試験片の表面粗さは約10μmRz、平面度Δhは約25μmである。研磨液には水ベース磁性流体(タイホー工業製、W-40)に、砥粒GC#1000, #3000及び#10000(平均粒径11.5μm, 4.0μm及び0.6μm)をそれぞれ10Vol%配合したものを研磨液として用いた。ラップ盤の回転速度は80rpm、荷重は1N, 10N及び30Nとし、コイル電流は0A, 3A, 6A及び10Aとした。研磨時間は15分とした。研磨後の試験片の評価は触針式粗さ計を用い、半径方向に断面曲線を測定することにより表面粗さと平面度を求めた。表面あらさとしては測定長さ40mmにおける最大高さRzを求めた。平面度は直径と同じ長さを測定長さとした断面曲線の最大振幅から求めた。また、走査型電子顕微鏡を用いて研磨面表面の観察を行った。

4. 実験結果

4.1 表面粗さと平面度に及ぼす磁場の影響 平均粒径dが11.5μm, 4.0μm及び0.6μmの3種類の砥粒を用い、磁場を印加した場合と印加しない場合において研磨実験を行った。得られた研磨面の粗さ曲線を表1に示す。表より、いずれの砥粒粒径においても、磁場を印加した場合の方が、磁場を印加していない場合に比べて表面粗さが減少していることが分かる。特に4μm以下の砥粒においては、磁場を印加した場合のほうが平坦な部分が大部分を占め、深い谷部が少ないことがわかる。

表1よりRzを読みとり、それをまとめたものを、異なる砥粒粒径における表面粗さに及ぼす磁場の影響として図5に示す。図より、いずれの砥粒粒径において、磁場を印加した場合の方が、印加していない場合よりも表面粗さが減少していることがわかる。平均粒径11.5μmにおいては約25%, 平均粒径4.0μmにおいて

Table 2 SEM images of lapped surface with and without magnetic field

Without magnetic field #3000 ($d=4.0\ \mu\text{m}$) $w=30\text{N}$	
With magnetic field #3000 ($d=4.0\ \mu\text{m}$) $w=30\text{N}$	

は約 60%，平均粒径 $0.6\ \mu\text{m}$ においては約 40%，表面粗さが減少した。

異なる砥粒粒径における平面度に及ぼす磁場の影響を図 6 に示す。図より、いずれの砥粒粒径において、磁場を印加することで、平面度が減少することが分かる。特に、 $4.0\ \mu\text{m}$ 以下の砥粒においては、磁場を印加していない場合と比べて約 50～60% 程度平面度が減少することが分かる。また、砥粒粒径が大きい場合は、平面度が著しく増加していることが分かる。これは粒径が大きい場合、砥粒が試験片中央部まで進入することが出来ず面ダレが著しくなったためと考えられる。

4.2 表面粗さと平面度に及ぼす磁場強度の影響
平均粒径 d が $4.0\ \mu\text{m}$ の砥粒を用い、異なる磁場強度において研磨実験を行った。コイル電流は 0A, 3A, 6A 及び 10A の 4 種類で行った。図 7 に異なる磁場強度における表面粗さ R_z をまとめたグラフを示す。グラフより、磁場強度が大きくなるに従って R_z は減少していることが分かる。図 8 に異なる磁場強度における平面度 Δh をまとめたグラフを示す。 R_z と同様に磁場強度が大きくなるに従って Δh は減少することが分かる。

4.3 表面粗さと平面度に及ぼす荷重の影響
表面あらさ及び平面度が最も優れていた平均粒径 d が $4.0\ \mu\text{m}$ の砥粒を用いて、荷重を 1N, 10N 及び 30N の 3 条件で研磨実験を行った。図 9 に異なる荷重において磁場を印加した場合、印加しない場合における表面粗さ R_z をまとめたグラフを示す。グラフより、何れの荷重においても、磁場を印加して研磨を行った場合の方が R_z は減少していることが分かった。図 10 に異なる

荷重において磁場を印加した場合、印加しない場合における平面度 Δh をまとめたグラフを示す。グラフより、 R_z と同様に磁場を印加して研磨を行った場合の方が Δh は減少することが分かった。

5. 考察

5.1 表面粗さに及ぼす砥粒分布と磁場の影響
研磨後の 3D-SEM の画像を表 2 に示す。表より、磁場を印加した場合よりも、磁場を印加していない場合の方が、表面に深くえぐられている部分があり、さらに研磨痕の幅が広いことが分かる。図 1 に示した研磨面における砥粒の分布モデルでは、磁場を印加した場合においては、研磨液中の砥粒が比較的等間隔かつ均等に配列して研磨を行ったのに対し、磁場を印加していない場合においては、研磨液中の砥粒が凝集し研磨面において砥粒の大きな塊となって、それが研磨の際に表面を深く引っ掻くことによって、幅の広い研磨痕が出来たと考えられる。すなわち、研磨液に磁場を印加しない場合、砥粒の凝集が生じ、砥粒一個あたりの荷重は増大するため、研磨面に深い粗さや幅の広い研磨痕を作ったと考えられる。一方、研磨液に磁場を印加した場合、研磨液は砥粒を保持し、砥粒同士の間隔をある一定の距離に保ったままラップ盤に突き刺さる。その結果、砥粒の鋭利な切れ刃が配列した多刃工具が形成され、多刃切削により表面粗さが向上したと考えられる。

5.2 平面度に及ぼす砥粒分布と磁場の影響
研磨液に磁場を印加しない場合、砥粒は端部より研磨面に進入する際に多くが進入できない状態となり、その一部が大きな砥粒の塊となって研磨面に進入し、端部を切削した後に荷重により塊は崩壊し、個々の砥粒は破碎するため研磨能力は減少し、研磨領域外に排出されたと考えられる。粒径の大きい砥粒ではこの研磨機構が顕著に発生し、面だれ等が起きたと考えられる。しかしながら磁場を印加した場合においては、磁性流体中の砥粒は、お互いの斥力により、周囲の砥粒とある程度の距離を保って配列して研磨面に進入して研磨し、平面度が向上したと考えられる。

6. 結 言

磁性流体を研磨液として用いたガラス基板の磁気平面ラッピングにおいて、表面粗さと平面度に及ぼす磁場の影響を明らかにするために、垂直磁場を印加可能なラップ加工装置を改造、試作し、研磨実験を行い、磁場下における磁性流体中の砥粒の挙動を観察することによって、以下の知見を得た。

(1) 異なる粒径の砥粒を用いて研磨実験を行った結果、表面粗さ R_z は磁場を印加して研磨を行うことによって約 20～60% 減少し、平面度 Δh も約 20～60% 減少し

た.特に平均粒径 d が $4.0\mu\text{m}$ 以下の砥粒を用いた場合においては約 50~60%減少した.

(2)異なる磁場強度で研磨実験を行った結果,磁場が強くなるに従って表面粗さ R_z は約 20~60%減少し,平面度 Δh も約 15~60%減少した.

(3)異なる荷重で研磨実験を行った結果,磁場を印加することによって,表面粗さ R_z は約 15~60%減少し,平面度 Δh も約 30~60%減少した.

文 献

- 1) Imanaka, O., Kurobe, T. et al., *Proc. of Spring Conference of JSPE* (1981)p. 774.
- 2) Tani, Y. et al., *Production Engineering*, Vol. 35, No. 12(1983), pp. 531-539.
- 3) Umehara, N. and Kato, K., *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 54(1988), pp. 1599-1604.
- 4) Umehara, N., *Annals of CIRP*, Vol. 43, (1994), pp. 185-188.
- 5) Kato, K, Umehara, N. and Baba, Y., *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 55(1989), pp. 2873-2878.
- 6) Umehara, N., Kato, K. and Watanabe J., *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 55(1989), pp. 2879-2884.
- 7) Umehara, N. and Komanduri, R., *Wear*, Vol. 192 (1996), PP. 85-93.
- 8) Umehara, N., Kato, K., Mizuguchi, S. and Nakamura, S., *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 60, No. 11(1994), pp. 1606-1610.
- 9) Taketomi, S., and Chikazumi, S., *Fundamental of magnetic fluid*, Nikkan-Kogyo Pub., (1988), PP. 153-172.
- 10) Shimoizaka, J., *Bulletin of the Japan Institute of Metals*, Vol. 15, No. 22 (1976), PP. 77-82