

# 砥粒加工学会誌

Journal of the Japan Society  
for Abrasive Technology

## スピンドルスルー型磁極を用いた平面磁気研磨 ー研磨性能に及ぼす粒子ブラシの影響ー

川久保英樹，土屋和博，佐藤運海，山崎隆夫，三木一隆，手塚佳夫

第46巻 第8号 別刷  
8月1日 発行

社団法人 砥粒加工学会

## スピンドルスルー型磁極を用いた平面磁気研磨

## — 研磨性能に及ぼす粒子ブラシの影響 —

川久保英樹<sup>\*1</sup>, 土屋和博<sup>\*2</sup>, 佐藤運海<sup>\*3</sup>, 山崎隆夫<sup>\*1</sup>, 三木一隆<sup>\*1</sup>, 手塚佳夫<sup>\*1</sup>

Surface magnetic polishing using spindle through type magnetic pole

— Influence of particle brush on polishing characteristics —

Hideki KAWAKUBO, Kazuhiro TSUCHIYA, Unkai SATOH, Takao YAMAZAKI, Kazutaka MIKI and Yoshio TEZUKA

強磁性材粒子のみで形成された粒子ブラシに、研磨材スラリーを循環供給しながら平面磁気研磨を行った。研磨材スラリーの供給には、スピンドルスルー供給方式を採用した。これによって、磁性研磨材の寿命により、研磨能率が低下することを防止できる。本研究では、粒子ブラシに関する基本特性について実験的に検討した。得られた結果は次のとおりである。(1) 磁極回転数には最適な回転数が存在する。回転数が増加すると、粒子ブラシが単位時間あたりに加工面を通過する回数が増加するため、研磨性能は向上するが、高速回転になると研磨性能は低下する。(2) 粒子ブラシを構成する強磁性材の供給量には適量が存在する。(3) 砥粒径に適した強磁性材の粒径が存在することを明らかにした。強磁性材の粒径が大きくなると、微小切削における背分力が大きくなるため、砥粒の切り込みが増大して研磨量が多くなる。しかし、加工面へ擦過痕を残すため、仕上げ面は向上しない。(4) 30分までの連続研磨では研磨性能が低下しないため、粒子ブラシを交換することなく加工可能なことを明らかにした。

Key words : magnetic polishing, slurry, abrasive grain, stock removal, surface roughness

## 1. 緒言

磁気研磨法は、従来の固定工具では加工困難な部品の研磨<sup>1) 2)</sup>や、バリ取りなどに有効な加工法である。加工には、強磁性材粒子と砥粒などを構成要素とした粉体状の磁性研磨材を用いる。この磁性研磨材は、加工域に供給されると磁力線に沿って粒子同士が数珠つなぎに連結して、フレキシブルな粒子ブラシを形成する。そして、工作物の表面形状に倣って磁気吸引され、研磨圧力を発生する。この状態において、工作物と粒子ブラシの間に相対運動を与えて研磨する。

磁性研磨材に関しては、これまでに様々な研究<sup>3) 4) 5)</sup>が行われており、著者らも単純混合型磁性研磨材<sup>6) 7) 8)</sup>を用いて磁気研磨を行い、その研磨性能について実験的検討を進めてきた。しかし、磁性研磨材には寿命があり、砥粒切れ刃が鈍化すると研磨性能は低下するという問題点があった。このような問題を解決すべく、強磁性材のみで形成された粒子ブラシに研磨材スラリーを連続供給して研磨する方法が研究されてきた。

これらの研究には、研磨材スラリー中に平面形状の工作物を浸漬させ、これを粒子ブラシで研磨する方法<sup>9)</sup>、研磨材スラリーを円管内に循環供給して内面研磨する方式<sup>10)</sup>、スピンド

ル中心部から供給するスピンドルスルー供給方式<sup>11) 12)</sup>などがある。これらのうち、スピンドルスルー供給方式磁気研磨法の研究においては、研磨能率の向上効果、研磨材スラリーの供給に適した磁極先端形状については明らかにされているが、粒子ブラシを構成する強磁性材が研磨性能に及ぼす影響については不明な点も多い。

本研究は、研磨材スラリーを用いた磁気研磨による平面および自由曲面の研磨を目的として研究を進め、研磨材スラリーの供給には、スピンドルスルー供給方式を採用した。本報ではスピンドルスルー型磁極を用いた磁気研磨装置によって平面研磨を行い、粒子ブラシに関する基本特性について実験的に検討した。

## 2. 実験方法および実験条件

## 2.1 実験装置

スピンドルスルー型磁極を用いた平面磁気研磨装置を図1に示す。図1(a)は概略図、(b)は外観写真、(c)はスラリー供給用ユニット拡大図である。

この装置は、電磁コイル内に挿入した回転N磁極と回転S磁極を対向に配置したものであり、両磁極はヨークを介して閉磁気回路を形成している。N磁極は、回転と同時に工作物の半径方向に振動を与えることが可能な構造となっている。また、S磁極先端には非磁性材の工作物取り付け用テーブルが装

\*1 長野県工科短期大学校：〒386-1211 上田市下之郷 813-8

\*2 セイコーエプソン(株)：〒392-8502 諏訪市大和 3-3-5

\*3 新光電気工業(株)：〒383-8581 中野市草間 1216-9

〈学会受付日：2001年12月14日〉

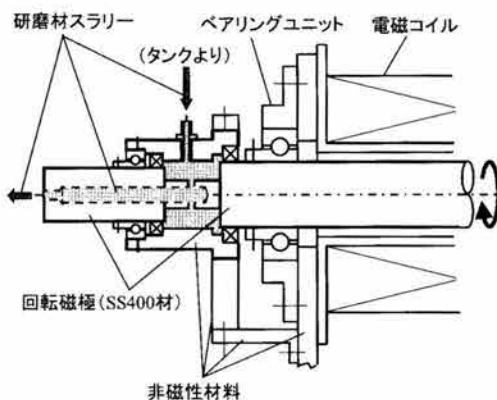
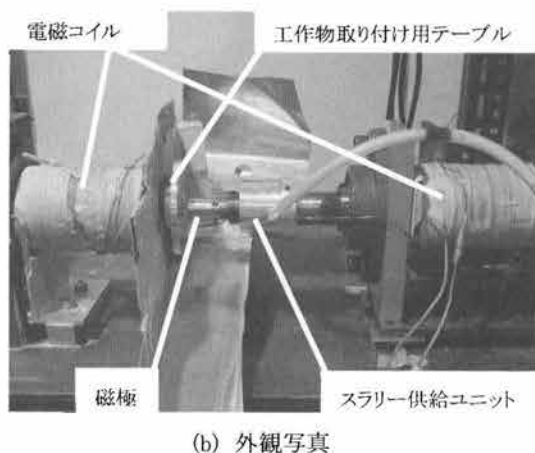
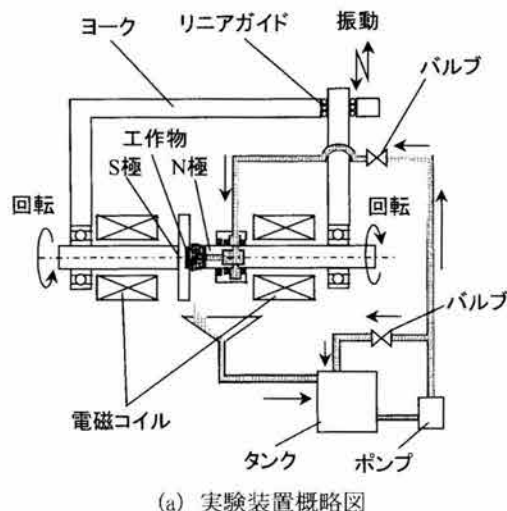


図1 磁気研磨装置

着されている。

強磁性材は、工作物とN磁極間に供給されると、磁力線に沿って粒子ブラシを形成し、工作物の表面に磁気吸引され、研磨圧力を発生する。研磨材スラリーは、N磁極に取り付けたスラリー供給用ユニットを介してスピンドルスルー穴へ誘導され、磁極先端へ供給される。研磨材スラリーの流量は、バル

表1 実験条件

|            |   |
|------------|---|
| N磁極回転方向    | CW  |
| S磁極回転      | 200 min <sup>-1</sup> , CCW                 |
| N磁極振動      | 振幅:20 mm, 振動数:1 Hz                          |
| 起磁力        | 3.0×3000 A・turn                             |
| 加工間隙       | 3 mm  |
| 研磨材スラリー供給量 | 300 mL / min                                |
| 砥粒混合割合     | 10 wt%                                      |
| 工作物        | SUS304 (φ20×2t mm)                          |
| 初期表面粗さ     | 1 μmRy                                      |
| 強磁性材       | ショットピーニング用鋼球<br>( 粒径:55, 115, 175, 260 μm ) |
| 砥粒         | WA#4000                                     |
| 研磨液        | 研削液<br>(ゾリューブルタイプ, 50 倍希釈)                  |

ブによって調整して一定量の供給とした。そして、加工域から流出した研磨材スラリーは、テーブル下部に設置された受け皿からタンクへ回収され、タンク内で攪拌後、ポンプを用いて循環供給する。

磁極先端形状は工作物径と同じφ20mmとし、先端にφ4mmのスラリー供給穴を設けた。なお、研磨材スラリーが加工面へ万遍なく供給されるように、供給穴は磁極中心から3mm偏心させた位置に設けた。

予備実験として、未使用の研磨材スラリーと100分間使用した研磨材スラリーを用いて研磨性能の比較を行った。その結果、ほとんど差が確認されなかったため、循環装置には切り屑除去用のフィルターを設けずに実験を行った。しかし、使用時間が長くなると、加工によって生じた切り屑が研磨材スラリー内に混在するようになり、実験結果に影響を及ぼす可能性があるため、120分使用した時点で交換して実験を行った。

## 2.2 実験条件および評価方法

表1に実験条件を示す。工作物是非磁性材料である板厚2mmのSUS304を使用した。初期表面粗さは1 μmRyである。本研究では、粒子ブラシの長時間使用を目的として、粒子表面が硬化された市販のショットピーニング用鋼球を使用した。粒径の違いによる研磨性能を比較するために、平均粒径55, 115, 175, 260 μmの4種類を用意した。また、研磨材スラリーは50倍に希釈した研削液と砥粒を混合して作製した。研磨量は、精密電子天秤(METTLER TOLEDO AT201)を用いて研磨前後の工作物重量を測定して求めた。表面粗さは、触針式粗さ計(ミツトヨ SURFTTEST SV-400)を用いて工作物の半径方向に測定した。

## 2.3 予備実験における砥粒混合割合の影響

表1の実験条件に示した砥粒混合割合を決定するために予備実験を行った。図2に砥粒混合割合を変化させたときの

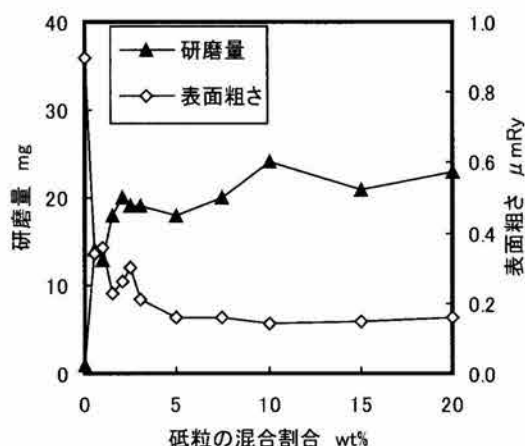


図2 研磨材スラリーの砥粒混合割合を変化させたときの研磨量および表面粗さの関係 (N磁極:  $1300 \text{ min}^{-1}$ , 研磨時間: 10 min, 強磁性材の粒径:  $115 \mu\text{m}$ , 強磁性材の供給量: 4.0g)

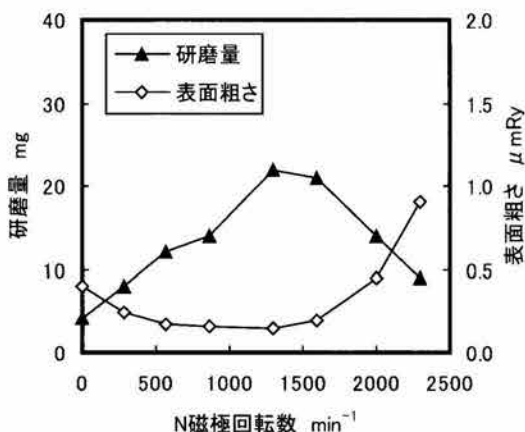


図3 N磁極回転数と研磨量および表面粗さの関係 (強磁性材の粒径:  $115 \mu\text{m}$ , 強磁性材の供給量: 4.0g, 研磨時間: 10 min)

研磨量と表面粗さの関係を示す。砥粒の混合割合が 0wt%, すなわち研削液のみの場合はほとんど研磨されないが、砥粒を混合することによって、その効果が明確に現れるようになる。研磨量は砥粒の混合割合が増加するにつれて、はじめは急激に増加するが、その後は飽和状態になった。また、表面粗さについても研磨量と同様の傾向を示し、7.5wt%以降は表面粗さに差がみられなくなる。

この事象は、砥粒の混合割合が多くなると砥粒の攪拌にムラが生じ、砥粒切れ刃数の増加効果が得られなかったためと考えられる。研磨材スラリーの攪拌ムラや循環用ポンプの性能を考慮すると、本実験条件においては 7.5~10wt%の混合割合が適当であると思われる。本研究では、研磨量の最大値が得られた 10wt%で実験を行った。

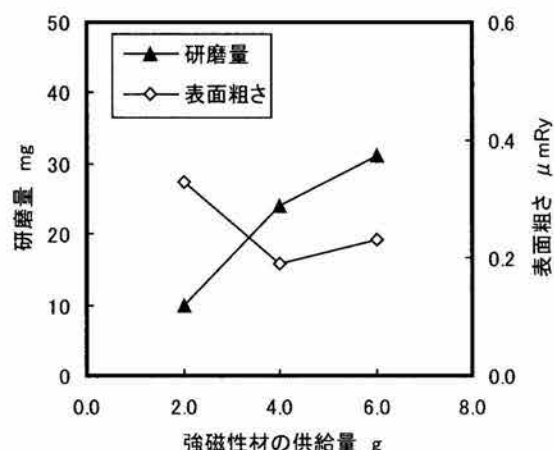


図4 強磁性材供給量を変化させたときの研磨量および表面粗さの関係 (N磁極:  $1300 \text{ min}^{-1}$ , 研磨時間: 10 min, 強磁性材の粒径:  $115 \mu\text{m}$ )

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 磁極回転数の影響

図3にN磁極の回転数を変化させたときの研磨量および表面粗さの関係を示す。回転数が  $1300 \text{ min}^{-1}$  までは研磨量は増加する傾向を示した。これは、粒子ブラシが単位時間あたりに加工面を通過する回数が増加するためである。

しかし、回転数が  $1300 \text{ min}^{-1}$  よりも大きくなると、逆に研磨量が減少し始める。  $2300 \text{ min}^{-1}$  においては、高速回転に伴う加工熱の上昇によって、研磨材スラリー中の油脂成分が加工面を覆うように付着してしまい、研磨されなかった。また、粒子ブラシの一部は、磁極の回転に追従せず、遠心力によって飛散してしまう現象もみられた。表面粗さについては、570, 860, 1300,  $1600 \text{ min}^{-1}$  において、ほぼ同程度の値であった。

#### 3.2 強磁性材供給量の影響

図4に強磁性材供給量を変化させたときの研磨量と表面粗さの関係を示す。強磁性材供給量が多くなるにつれて研磨量は増加する傾向がみられる。本装置は工作物の半径方向に振幅 20mmの往復振動運動を与えているため、N磁極が工作物中心から外れるときには、粒子ブラシと加工面の接触面積は小さくなる。しかし、強磁性材供給量が多い場合、加工面との接触面積が増えるため、N磁極が振動運動によって工作物から抜けた際にも、粒子ブラシの一部が加工に関与しており、研磨量は増加する。

表面粗さについては、研磨量の場合と同様、粒子ブラシ数が少ないと加工に関与する砥粒数も減少するため、表面粗さは向上しない。しかし、粒子ブラシ数が多ければ良いというわけではなく、一定供給量以上では表面粗さに変化はなくなる。更に供給量を多くすると、余分な強磁性材は遠心力によって飛散するようになる。

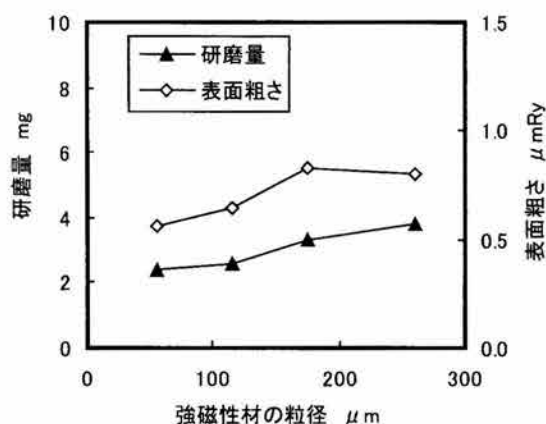


図5 強磁性材のみで研磨したときの強磁性材粒径と研磨量および表面粗さの関係

(N磁極:  $1300 \text{ min}^{-1}$ , 強磁性材の供給量: 4.0g, 研磨時間: 10 min, 砥粒混合割合: 0wt%)

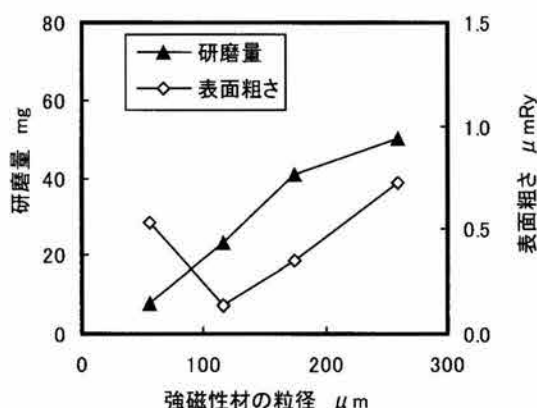
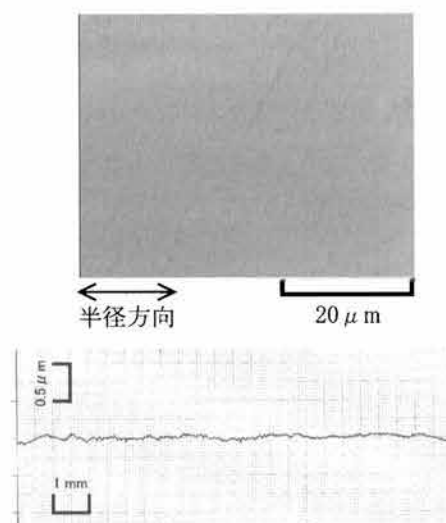


図6 強磁性材粒径を変化させたときの研磨量および表面粗さの関係 (N磁極:  $1300 \text{ min}^{-1}$ , 強磁性材の供給量: 4.0 g, 研磨時間: 10 min)

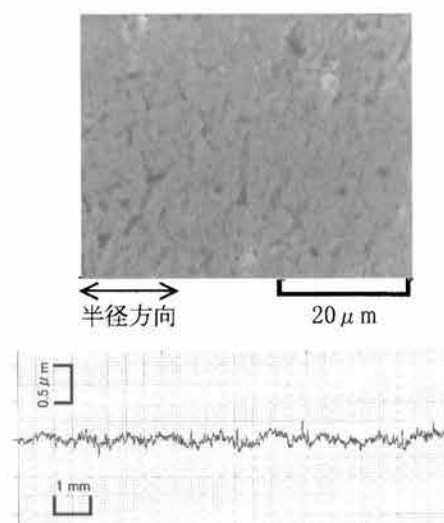
### 3.3 強磁性材の粒径の影響

強磁性材のみで研磨したときの影響を検討するため、研磨材スラリーは供給せずに粒子ブラシに研磨液のみを供給して研磨した。図5に研磨量と表面粗さの関係を示す。強磁性材のみで研磨した場合、前述した油脂成分の付着物が加工面を覆ってしまうため、研磨量がほとんど得られなかった。表面粗さは、強磁性材の擦過によるものであるが、強磁性材の粒径が大きくなるにつれて、ごく僅かではあるが大きくなる傾向を示した。

次に、粒子ブラシに研磨材スラリーを循環供給しながら研磨を行った。図6に強磁性材の粒径を変化させたときの研磨量と表面粗さの関係を示す。図5と比較して、砥粒が供給されることによって、強磁性材の粒径が研磨性能に及ぼす影響は大きくなる。研磨量については強磁性材の粒径が増大するに



(a) 強磁性材の粒径:  $115 \mu\text{m}$



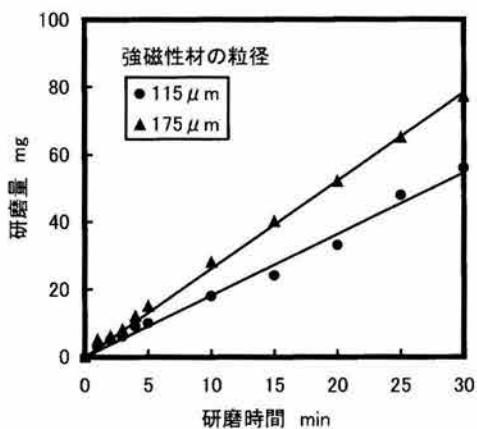
(b) 強磁性材の粒径:  $260 \mu\text{m}$

図7 表面の SEM 写真および粗さプロファイル

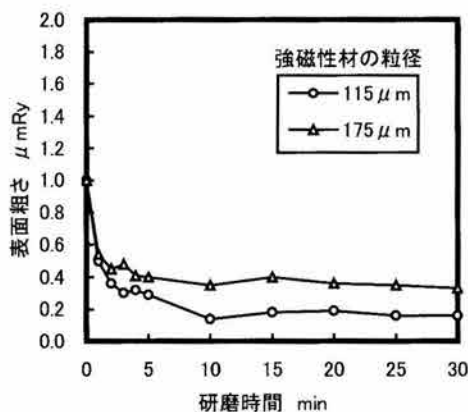
つれて増加する傾向を示し、表面粗さについては粒径が  $115 \mu\text{m}$  のときが最適であった。粒径が小さい  $55 \mu\text{m}$  のときは前加工面が完全に除去されず、粒径が大きい  $260 \mu\text{m}$  の場合には、加工面に擦過痕が残る、表面粗さが大きくなった。図7に表面の SEM 写真および表面粗さプロファイルを示す。図7(a)は強磁性材の粒径が  $115 \mu\text{m}$ 、(b)は  $260 \mu\text{m}$  のときである。

この事象は、次のように考えられる。加工域における磁場と強磁性材の磁化率が一定であるとき、強磁性材の粒径が大きくなると粒子1個に作用する磁気力は粒径の3乗に比例して増大する<sup>13)</sup>。この磁気力によって強磁性材粒子1個が加工面へ押し付けられた状態を考え、平面と球のヘルツ接触理論にあてはめて接触応力を計算すると、平均接触応力の比は強磁性材の粒径が  $115 \mu\text{m}$  のときを1とした場合、粒径が  $55 \mu\text{m}$  で約0.8倍、 $175 \mu\text{m}$  で約1.1倍、 $260 \mu\text{m}$  で約1.3倍となる。





(a) 研磨量



(b) 表面粗さ

図8 研磨時間と研磨量および表面粗さの関係 (N磁極: 1300 min<sup>-1</sup>, 強磁性材の供給量: 4.0g)

この接触応力が研磨圧力となり、砥粒を加工面へ押し付ける。しかし、計算によって求めた接触応力の比と図6の結果を比べると、接触応力の比以上に研磨性能は大きく変化している。これは、単純に強磁性材粒子1個の研磨圧力が影響を及ぼしているわけではなく、砥粒径と強磁性材の組み合わせが大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

砥粒は強磁性材粒子と工作物の間に入り込むと、強磁性材粒子から押し付け力を受けて加工面を微小切削する。砥粒および強磁性材が球形であると仮定すると、砥粒に作用する主分力と背分力は幾何学的に求められ<sup>7)8)</sup>、本実験条件のように砥粒径が一定であるとき、強磁性材の粒径を大きくすると背分力は大きくなる。そのため、強磁性材の粒径が大きいときには、砥粒の切り込みが増大して研磨量が多くなるが、切り込みの増大によって生じた擦過痕により表面粗さの値は大きくなると考えられる。逆に、強磁性材の粒径が小さくなると、背分力は小さくなり、研磨量は減少して前加工面が完全に除去されない。

著者らは磁性研磨材に関する研究<sup>7)8)</sup>において、強磁性材の粒径と砥粒径の関係について明らかにしてきたが、研磨

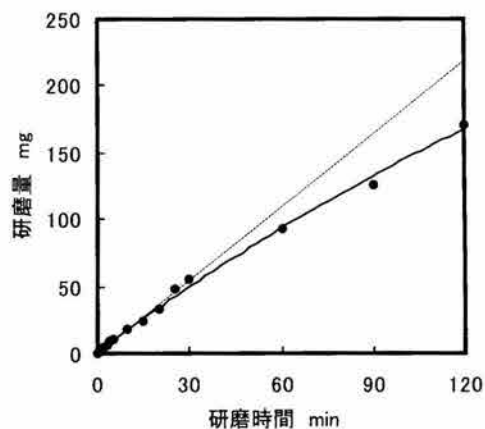


図9 研磨時間と研磨量の関係 (N磁極: 1300 min<sup>-1</sup>, 強磁性材の粒径: 115 μm, 強磁性材の供給量: 4.0g)

材スラリーを用いた磁気研磨においても同様に、砥粒径に適した強磁性材の粒径が存在することを明らかにした。

### 3.4 研磨時間と研磨性能について

図8に研磨時間と研磨量および表面粗さの関係を示す。強磁性材の粒径を変化させたときの影響についても同時に検討した。なお、前節の結果より、強磁性材の粒径が 55 μm および 260 μm のときは良好な仕上げ面が得られないため、除外して実験を行った。

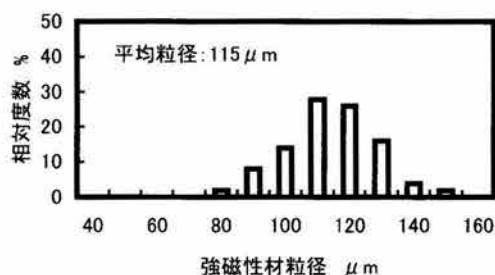
研磨量は時間経過とともにほぼ一定の割合で増加する。従来の磁性研磨材を使用して加工した場合、研磨時間が長くなると砥粒の脱落、砥粒切れ刃の鈍化などによって研磨能率が低下する問題があったが、本方式では、この問題が解決できることを確認できた。これは、常に新しい砥粒が磁極の先端から供給されること、および、それまで加工に関与していた砥粒と切り屑が良好に排出されたためである。

表面粗さについては、研磨開始 5 分から 10 分までに急激に向上し、その後はほとんど変化しなくなる。図6の結果と同様、両者とも同じ粒径の砥粒を用いているが、得られた表面粗さは、それぞれ固有の値になった。すなわち、強磁性材の粒径が 115 μm の場合には 0.14 μmRy であり、175 μm の場合には 0.35 μmRy であった。

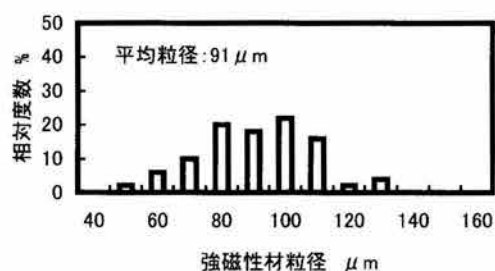
### 3.5 連続研磨における研磨能率の変化

図9に研磨時間と研磨量の関係を示す。強磁性材は交換せずに、連続研磨したときの結果である。補助線は、研磨開始 30 分までの実験結果から予測した研磨量の直線である。研磨時間が長くなると予測直線を下回ることがわかる。これは、砥粒との接触や強磁性材同士の接触によって、粒径が小さくなり、前述のとおり、砥粒に作用する背分力が減少したためと考えられる。

図10に研磨前と研磨後の強磁性材粒径の分布を示す。図10(a) は研磨前、(b) は 120 分間使用後のときである。図11



(a) 研磨前



(b) 120 分使用後

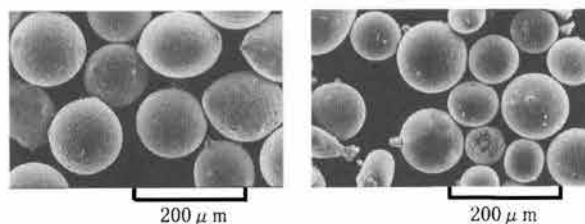
図10 研磨前後の強磁性材粒径の分布

には研磨前と120分使用後の強磁性材のSEM写真を示す。使用時間が長くなるにつれ、強磁性材の平均粒径は小さく、ばらつきは大きくなった。目視観察によると、平面磁気研磨においては、粒子ブラシ内の攪拌があまり無く、N 磁極近傍に比べて加工面と接する粒子ブラシ先端部の摩耗が大きくなる。そのために、使用後の強磁性材のばらつきが大きくなったものと思われる。また、強磁性材粒子の切り屑は、非磁性体である砥粒や工作物の切り屑とは一緒に排出されず、粒子ブラシ間に残留してしまう。これによって砥粒の加工域への供給が十分に行われず、研磨性能が低下することも推測される。

#### 4. 結 言

本研究で得られた結果をまとめると次のとおりになる。

- (1) 磁極回転数には最適な回転数が存在する。回転数が高くなると、単位時間に工作物表面を通過する粒子ブラシ数が増加するため、研磨性能が向上する。しかし、高速回転になると加工熱の上昇によって、研磨材スラリー中の油脂成分が加工面を覆うように付着するため、研磨性能は低下する。
- (2) 粒子ブラシを構成する強磁性材の供給量には適量が存在する。また、粒子ブラシ数が少ないと作用砥粒数も減少するため、研磨性能は低下する。
- (3) 砥粒径に適した強磁性材の粒径が存在することを明らかにした。強磁性材の粒径が大きくなると、微小切削における背分力が大きくなるため、砥粒の切り込みが増大



(a) 研磨前

(b) 120 分使用後

図11 研磨前と120分使用後の強磁性材のSEM写真  
(使用前の平均粒径 115 μm)

して研磨量が多くなる。しかし、加工面へ擦過痕を残すため、仕上げ面は向上しない。

- (4) 強磁性材粒子にショットピーニング用鋼球を用いた場合、30分までの連続研磨では研磨性能が低下しないため、粒子ブラシを交換することなく加工可能なことを明らかにした。

最後に、本研究に対して貴重なご助言を賜った宇都宮大学 進村武男教授に感謝の意を表します。

#### 5. 参考文献

- 1) 進村武男, 山口ひとみ: 内面磁気研磨法に関する研究—研磨特性に及ぼす磁場分布の影響—, 砥粒加工学会誌, 44, 4(2000)180.
- 2) 山口ひとみ, 進村武男, 小林厚: 磁気研磨法による曲がり管内面の精密仕上げに関する研究, 日本機械学会 1999 年次大会講演論文集(V), (1999) 53.
- 3) 真崎浩一, 安斎正博, 中川威雄: プラズマ粉末溶融法により作製した磁性砥粒を用いた磁気研磨, 精密工学会誌, 56, 5(1990)935.
- 4) 鈴木清, 高松洋, 大橋裕之, 米村朋浩, 宮寄英児, 植松鉄太郎: 単繊維状磁性研磨材を用いた磁気研磨法に関する研究(第1報)—磁性研磨材への金属短繊維混入の効果—, 1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990)307.
- 5) 進村武男, 伊部輝, 藤田秀樹: 磁気研磨法による微細金型の精密仕上げに関する研究(新しい磁性砥粒の開発とその研磨性能), 日本機械学会山梨講演会講演論文集, (2000)101.
- 6) 土屋和博, 清水保雄, 鹿川裕一, 佐藤元太郎: 磁気研磨法における各種磁性研磨材の研磨性能に関する研究, 先端加工学会誌, 12(1993)43.
- 7) 川久保英樹, 土屋和博, 孫運海, 手塚佳夫, 三木一隆, 山崎隆夫: 単純混合型磁性研磨材を用いた円管内面研磨, 砥粒加工学会誌, 43, 2(1999)75.
- 8) 川久保英樹, 土屋和博, 孫運海, 手塚佳夫, 三木一隆, 山崎隆夫, 佐藤元太郎, 進村武男: 平面研磨における単純混合型磁性研磨材の研磨性能に関する研究, 砥粒加工学会誌, 44, 6(2000)282.
- 9) 安斎正博, 須藤亨, 大滝久規, 中川威雄: スラリー状研磨材を用いた磁気研磨の試み, 砥粒加工学会誌, 37, 1(1993)51.
- 10) 進村武男, 山口ひとみ, 渡辺将人: 磁気研磨法による内面の平滑加工に関する研究—研磨材スラリー循環方式の提案とその研磨特性—, 精密工学会誌, 67, 4(2001)575.
- 11) 安斎正博: 研磨材スラリーを用いた磁気研磨法の応用, 光技術コンタクト, 31, 12(1993)755.
- 12) 吉岡伸宏, 番野茂樹, 安斎正博, 中川威雄: 電気カミソリ用磁気研磨システムの開発, 1999 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1999)211.
- 13) 進村武男, 山口ひとみ: 磁気研磨法による内面の平滑加工に関する研究(ステンレス鋼円管およびクリーンガスボンベ内面の精密研磨), 日本機械学会論文集(C 編), 59, 560(1993)1261.