

砥粒加工学会誌

Journal of the Japan Society
for Abrasive Technology

溝の底面およびエッジ部の磁気研磨特性に及ぼす粒子ブラシの影響

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47巻 第3号 別刷
3月1日 発行

社団法人 砥粒加工学会

溝の底面およびエッジ部の磁気研磨特性に及ぼす 粒子ブラシの影響

川久保英樹^{*1}, 土屋和博^{*2}, 佐藤運海^{*3}, 山崎隆夫^{*1}, 三木一隆^{*1}, 手塚佳夫^{*1}

Influence of the particle brush on magnetic polishing performance in groove bottom and edge

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

溝付き工作物の表面および溝の底面の高能率研磨を目的として、スピンドルスルー型磁極を用いた磁気研磨を行い、粒子ブラシが研磨特性に及ぼす影響を検討した。結果をまとめると次のとおりである。(1) 溝底面の研磨には、溝深さに対する強磁性材の粒径が大きく依存しており、溝深さ/強磁性材粒径の比が大きくなると溝底面は研磨されない。また、研磨後の表面粗さは強磁性材の粒径に依存する。(2) 本加工法は、段差が1mm程度の場合においても表面と溝底面の除去厚さの差が数 μm の範囲に加工可能である。(3) エッジ部の丸み半径の大きさは、強磁性材の粒径に依存する。特に、溝深さが小さい場合には溝深さよりも粒子半径の小さい強磁性材を使用することにより、エッジ部の過剰除去を抑制できる。(4) 強磁性材の粒径を変えて2段階研磨する方法を提案した。これによって、溝底面の表面粗さを更に向上できることを明らかにした。

Key words : magnetic polishing , ferromagnetic particles , particle size , slurry , abrasive grain , surface roughness , edge

1. 緒言

磁気研磨法は、フレキシブルな粒子ブラシを利用して曲面および段差面を有する工作物の研磨や、バリ取りに有効な加工法である^{1)~5)}。その中でも溝付き工作物の研磨については、磁極と工作物の間隙、電磁コイルへの励磁電流や磁極回転数を制御することにより溝内面やエッジ部を精密仕上げる方法³⁾⁴⁾がある。

また、研磨能率の向上を目的として、専用の磁性砥粒は使用せずに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についても研究されてきた^{6)~10)}。その中でもスピンドルスルー型磁極を用いた磁気研磨については様々な検討が行われており、一定時間研磨後に新しい強磁性材粒子を自動供給して研磨能率を安定化させるシステムや、テスラメータで磁力を検出して磁力が低下すると鉄粉を自動供給するシステムを備えた研磨装置についての報告がある⁸⁾。このように、スピンドルスルー型磁極を用いて研磨材スラリーを供給する方法は、自動研磨システムを構築するという点において有効な方法であるが、粒子ブラシが研磨性能に及ぼす影響に関しては不明な点も多い。そこで、著者らはスピンドルスルー型磁極を用いた平面磁気研磨において、粒子ブラシに関する実験的な検討を行い、強磁性材の粒径が研磨性能に及ぼす影響を明らかにしてきた¹¹⁾。

本報では、溝付き工作物の表面および溝底面の高能率研磨を目的として、スピンドルスルー型磁極を用いた磁気研磨

を行い、粒子ブラシが研磨特性に及ぼす影響について実験的に検討した。また、溝のエッジ部およびコーナー部の形状についても検討し、二、三の知見が得られたので報告する。

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磁気研磨装置を図1に示す。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する。N磁極は、回転と同時に振動を与えることができる。S磁極先端には非磁性材の工作物取り付け用テーブルを装着し、回転運動を与える。図2にN磁極と工

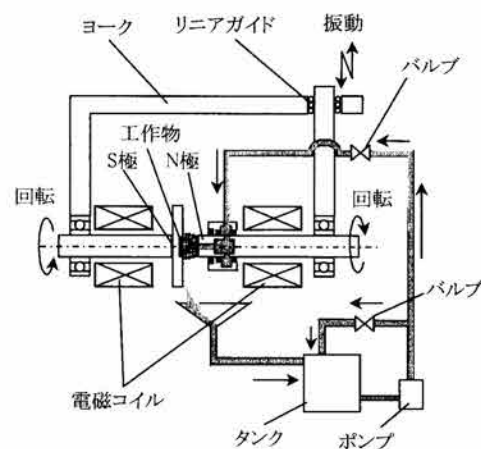


図1 実験装置の概略図

*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 信州大学教育学部 (〒380-8544 長野市西長野 6-ロ)

(学会受付日:2002年7月15日)

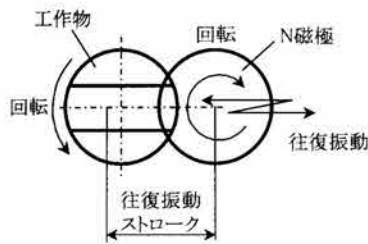


図2 工作物とN磁極の相対運動

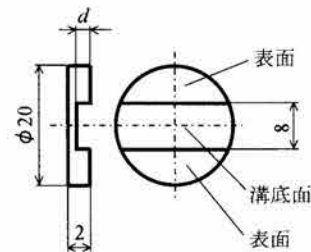


図3 工作物の形状

表1 実験条件

N磁極回転数	1300 min ⁻¹ , CW
N磁極振動	ストローク:20 mm, 振動数:1 Hz
S磁極回転数	200 min ⁻¹ , CCW
起磁力	3.0×3000 A・turn
加工間隙	3 mm
スラリー供給量	300 mL / min
工作物	SUS304 (φ20×2t mm) 溝幅 : 8 mm 溝深さ <i>d</i> : 0.2, 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 mm 初期面粗さ : 2~3 μmRz
強磁性材粒子	ショットピーニング用鋼球 (115, 260, 420 μm), 4.0 g
砥粒	WA(#2000), 10 wt%
研削液	ソリュブルタイプ

作物の相対運動を示す。

強磁性材粒子は工作物と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て研磨圧力を発生する。粒子ブラシは磁極の延長にある研磨工具であり、実際には研磨材スラリー中の砥粒が強磁性材粒子から研磨力を受けることによって、表面を研磨する。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。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てタンク内で攪拌後、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均一に供給できるように、供給穴は磁極中心から3mm偏心させてある。本実験においては、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。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が、ほとんど差が確認されなかった。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、100分使用した時点で交換した。

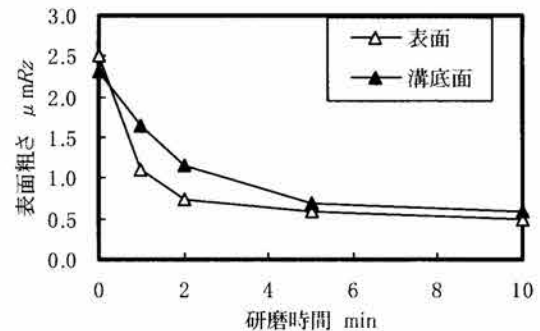


図4 研磨時間と表面粗さの関係 (溝深さ *d* : 1.0mm, 強磁性材の粒径: 260 μm)

2.2 実験条件および評価方法

実験条件を表1に示す。工作物の材質は SUS304 であり、ワイヤーカット放電加工機によって図3の形状に加工した。溝幅は溝深さに対して比較的大きい値(溝幅:8mm)とし、溝深さについては表中の数種類の形状を用意した。強磁性材には市販のショットピーニング用鋼球を使用した。その第一の理由は、硬度の高い粒子を用いることで、粒子同士の接触やスラリー中の砥粒との接触による粒子径の減少を最小限に抑えるためである。第二の理由は、強磁性材粒子の形状変化に伴った研磨能率の低下を抑えるためである。著者らの研究によれば、砥粒を保持するという点において強磁性材の形状は不定形粒子が適していることが明らかになっているが¹²⁾、不定形粒子は加工が進行すると角が除去されて最終的には球形に近づき、その研磨能率は低下してしまう。本研究のように、研磨開始の時点から球形のものを使用した場合、形状変化に伴った研磨能率の低下を考慮する必要がなくなる。本実験では、強磁性材の粒径の違いが研磨性能に及ぼす影響を検討するために 115, 260, 420 μm の3種類を用意した。

表面粗さは、触針式粗さ計を使用して溝に対して直行する方向、すなわちワイヤーカット放電加工におけるテーブルの送り方向に測定した。エッジ部形状については表面粗さ計の触針を走査させることで得られる断面プロフィールから求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 研磨時間と表面粗さについて

図4に研磨時間と表面粗さの関係を示す。これは溝深さ

1.0mm の工作物に対して、 $260\mu\text{m}$ の強磁性材による粒子ブラシを用いて研磨した結果である。表面粗さは、表面部については研磨開始2分までに、そして溝底部は研磨開始5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。研磨開始直後には表面と溝底面の表面粗さに差がみられた。この事象は次のように考えられる。粒子ブラシは溝の段差部において粒子間の結合が分断されて、N 磁極とともに回転するものと溝内に残留するものとに分かれる。そして、N 磁極側の粒子ブラシは工作物の表面を研磨し、溝内の粒子は他の粒子と再結合して溝底面の加工に関与する。このとき溝底面における相対運動が減少し、研磨開始直後には表面粗さに差がみられたと思われる。しかし、研磨開始5分でその差はほとんどなくなり、最終的には $0.6\mu\text{mRz}$ の表面粗さに向上した。図示していないが、 $420\mu\text{m}$ の強磁性材についても同様の傾向を示し、表面粗さは研磨開始5分で $1\mu\text{mRz}$ の表面粗さに向上した。一方、 $115\mu\text{m}$ の強磁性材を用いた場合には、溝底面が $0.8\mu\text{mRz}$ 、表面が $1.5\mu\text{mRz}$ であり、表面粗さに差がみられた。

3.2 溝深さと強磁性材粒径の影響

図5に溝深さ/強磁性材粒径の比と表面粗さの関係を示す。粒径が $420\mu\text{m}$ の場合、溝深さと強磁性材粒径の比に関係なく、表面と溝底面を同程度に向上することができた。また、粒径が $260\mu\text{m}$ については、溝深さと強磁性材粒径の比が大きくなる溝深さ 1.5mm を研磨した場合、溝底面が研磨されなかった。それに対して、粒径が $115\mu\text{m}$ の場合には、溝深さと強磁性材粒径の比が最も小さくなる溝深さ 0.2mm を研磨した場合を除いて、表面と溝底面の表面粗さに差がみられた。溝底面は全く研磨されないというわけではないが、表面粗さは向上しなくなる。

この事象は次のように考えられる。目視観察によると、溝が深くなるにつれて粒子ブラシは分断されやすくなり、前述のとおり、溝の段差部においては、粒子ブラシの分断と、強磁性材粒子が磁力線に沿って集合することによる粒子ブラシの再形成が繰り返される。粒子の結合力は、強磁性材の粒径に比例しているため¹³⁾、粒径が小さい場合には粒子ブラシの再形成能力が小さくなる。その結果、溝底面における粒子ブラシの相対運動は低下し、表面粗さが向上しなかったものと考えられる。

表面と溝底面が同時に研磨されている場合、表面粗さは強磁性材の粒径に応じた固有の値となり、強磁性材の粒径に大きく依存していることが明らかになった。以上により、溝深さ 0.2mm までは粒径 $115\mu\text{m}$ の強磁性材、溝深さが $0.2\sim 1.0\text{mm}$ までの範囲においては粒径が $260\mu\text{m}$ の強磁性材による粒子ブラシが適しているといえる。

図6に加工面の除去厚さを示す。除去厚さは研磨前後の工作物の厚さを測定し、その差から求めた。全体的な傾向として、強磁性材の粒径が大きいほど除去厚さも大きくなる傾向を示した。これは、強磁性材の粒径が大きくなるにつれ、背分力が増大するためである¹¹⁾。表面と溝底面の除去厚さの差

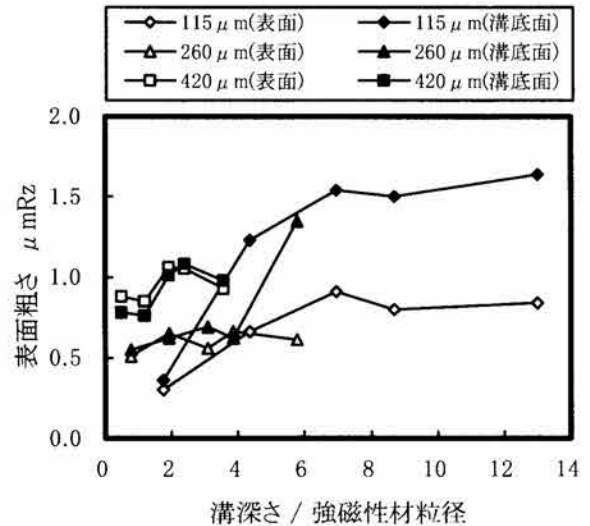


図5 溝深さ/強磁性材粒径の比を変化させたときの溝底部と表面部の表面粗さの関係 (研磨時間:10min)

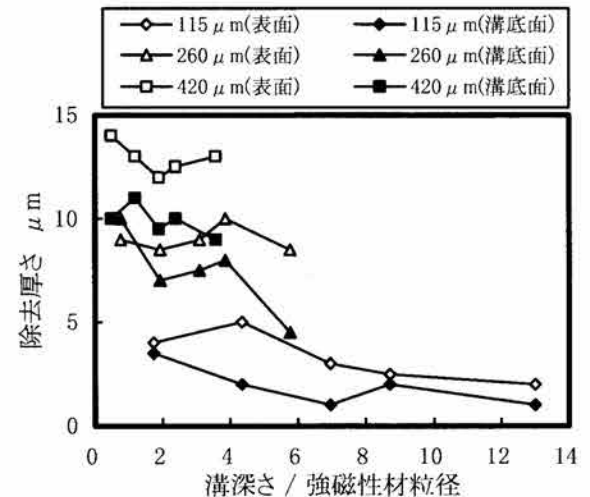


図6 溝深さ/強磁性材粒径の比を変化させたときの表面部および溝底部の除去厚さの関係 (研磨時間:10min)

は溝深さに関係なく、最大で $5\mu\text{m}$ 程度であった。バフ研磨などのように、弾性研磨工具によって段差面の表面部と溝底部を同時に加工した場合、凸部から除去されていくが、本加工法は段差が 1mm 程度であっても、除去厚さの差が数 μm の範囲に加工可能である。

3.3 溝のエッジ形状について

図7にエッジ位置の違いによる丸み半径の変化を示す。溝深さが 1.0mm の場合について測定を行った。測定位置については、図中に示すように工作物の中心線を基準にして左右に 3mm の間隔で測定した。なお、丸み半径 R は図8のように定義した¹⁴⁾。エッジ部の丸み半径は、実際には図8(a)のように完全な円弧にはなっていない。そこで、研磨前の理想的なエッジ先端から最も近い輪郭曲線までの距離 r を測定し、

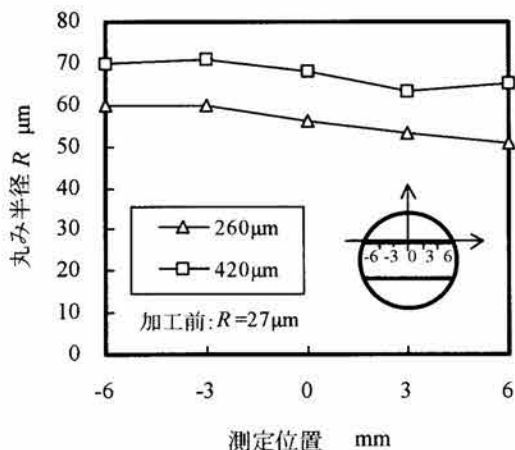


図7 エッジ部の位置と丸み半径の関係 (溝深さ $d : 1.0\text{mm}$, 研磨時間:10min)

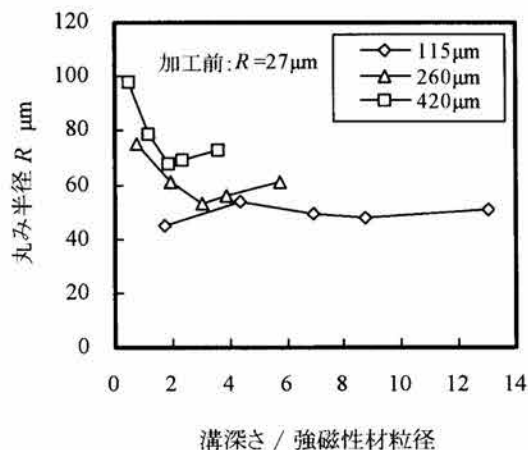


図9 溝深さ/強磁性材粒径の比とエッジ部の丸み半径の関係 (研磨時間:10min)

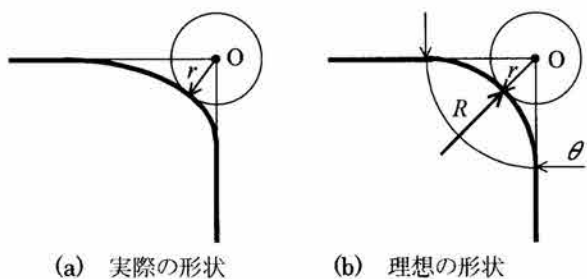


図8 エッジ部の丸み半径の定義 (参考文献 14)

式(1) を用いて丸み半径 R を求めた。

$$R = \frac{r}{\text{cosec} \frac{\theta}{2} - 1} \dots\dots\dots (1)$$

全体的な傾向として、正方向の測定位置において丸み半径 R の値が小さくなり、負方向との差は最大で $10 \mu\text{m}$ 程度であった。この事象は工作物の回転方向と N 磁極の回転方向に関係があり、負方向の相対速度が正方向の相対速度よりも大きいため、除去量が多くなったものと思われる。

図9に溝深さ/強磁性材粒径の比とエッジ部の丸み半径の関係を示す。エッジ部の測定箇所は、図7に示した0の位置とした。強磁性材の粒径が大きくなると丸み半径の値は大きくなる傾向を示した。また、溝深さと強磁性材粒径の比が小さいとき、すなわち、溝が浅い場合において強磁性材粒径による影響は大きくなる。特に、溝深さが 0.2mm においてその影響が最も顕著に現れており、エッジ部の過剰な除去が確認された。図10に溝深さが 0.2mm における断面の形状を示す。加工前の溝底コーナ部の R 形状は、ワイヤーカット放電加工におけるワイヤー径 ($\phi 0.2\text{mm}$) によるもので、その半径は $100 \mu\text{m}$ である。図10(d)より、強磁性材粒径が $420 \mu\text{m}$ の場合には、エッジ部が過剰に除去されているのが確認できる。

図11は溝深さ 0.2mm と強磁性材の粒径の関係図である。

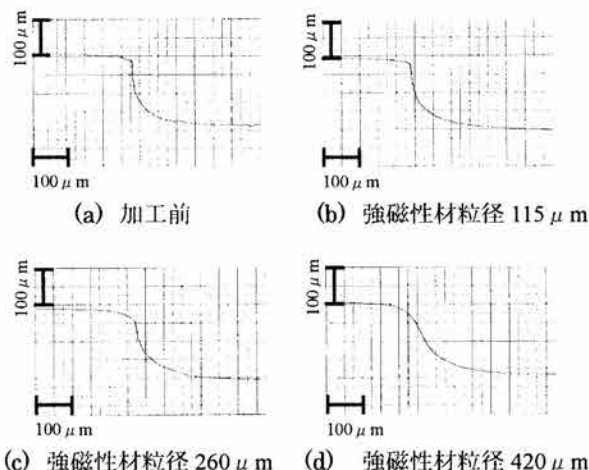


図10 エッジ部の断面形状 (溝深さ $d : 0.2\text{mm}$, 研磨時間:10min)

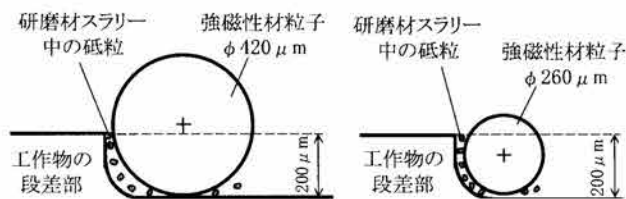
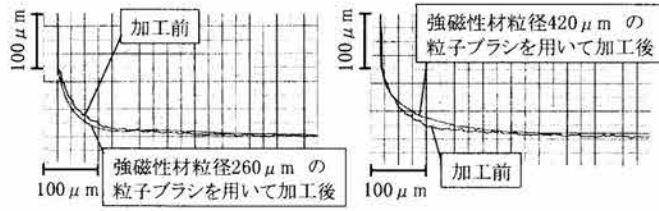


図11 溝深さ 0.2mm と強磁性材の粒径の関係

粒径が $420 \mu\text{m}$ の場合、粒子ブラシの最先端にある粒子の中心は、段差位置よりも高い位置にある。したがって、溝底面に接している粒子は段差によってブラシから分断することなく溝を乗り越えることができる。そのため、エッジ部が除去されて、丸み半径の値が大きくなると思われる。それに対して、粒径が $115 \mu\text{m}$ や $260 \mu\text{m}$ の場合には粒子の中心位置は段差位置よりも低いため、粒子は溝の段差を乗り越えずに粒子ブラシが適度に分断する。その結果、エッジ部における過剰な除去が



(a) 強磁性材の粒径 $260 \mu\text{m}$ (b) 強磁性材の粒径 $420 \mu\text{m}$
 図12 コーナーR部の形状
 (溝深さ d : 1.0mm , 研磨時間: 10min)

抑制されたと考えられる。

以上より、溝深さが小さい場合には粒子ブラシの粒子径がエッジ形状に大きな影響を及ぼすことを明らかにできた。エッジ部の過剰な加工を抑制するためには、溝深さよりも小さい強磁性材粒子で形成される粒子ブラシを選定することが得策である。

図12に研磨前後の溝底コーナー部の形状を示す。図12(a)は強磁性材粒径が $260 \mu\text{m}$ の粒子ブラシを用いて研磨したとき、図12(b)は強磁性材粒径が $420 \mu\text{m}$ の粒子ブラシを用いて研磨したときの形状を研磨前の形状と比較した結果である。強磁性材粒径が $260 \mu\text{m}$ の場合はコーナー部が過剰除去される結果となった。それに対して、強磁性材粒径が $420 \mu\text{m}$ の場合はコーナー部には削り残しが存在する。この事象は次のように考えられる。研磨前のコーナーR半径は前述のとおり $100 \mu\text{m}$ である。粒径 $420 \mu\text{m}$ の強磁性材(粒子半径: $210 \mu\text{m}$)を用いた場合、コーナー部に強磁性材が接触しないため、スラリー中の砥粒に研磨力を伝達することができない。その結果、コーナー部の表面が十分に除去できないと考えられる。それに対して、粒径 $260 \mu\text{m}$ の強磁性材(粒子半径: $130 \mu\text{m}$)場合、強磁性材の粒子半径が加工前のコーナーR半径に近い値であるので、強磁性材粒子がコーナーR部と接触して、スラリー中の砥粒に研磨力を伝達することができる。その結果、コーナー部が十分に除去されたと考えられる。

3.4 粒子ブラシによる2段階研磨法

前節までの実験結果から総合的に判断すると、溝深さ 1.0mm までの範囲においては強磁性材の粒径は $260 \mu\text{m}$ が適していると思われるが、本節では溝底面と表面を更に向上させることを目的として2段階研磨法を提案した。一般には、砥粒の粒度を変えて徐々に表面粗さを向上していく場合が多いが、本研究では砥粒径はそのまま、粒子ブラシを構成している強磁性材の粒径のみを変化させて表面粗さを向上させる。すなわち、第一段階として粒径が $260 \mu\text{m}$ の強磁性材を用いて研磨し、第二段階として粒径が $115 \mu\text{m}$ の強磁性材を用いて第一段階後の加工面を研磨する。

図13に第二段階研磨時における研磨時間と表面粗さの関係を示す。溝深さは 1.0mm の場合である。図4の結果と同様に、研磨開始直後には表面と溝底面の表面粗さに差がみられた。しかし、研磨開始2分でその差は小さくなる傾向を示

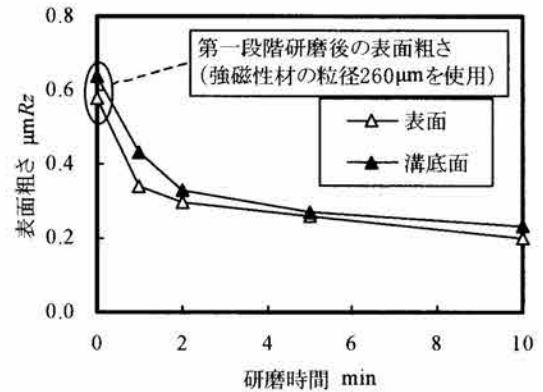


図13 第二段階研磨における研磨時間と表面粗さの関係
 (第一段階研磨時間: 10min , 第一段階研磨時の強磁性材の粒径: $260 \mu\text{m}$, 第二段階研磨時の強磁性材の粒径: $115 \mu\text{m}$, 溝深さ d : 1.0mm)

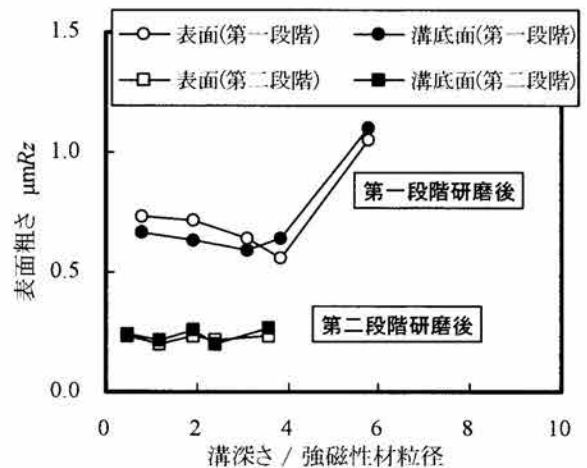
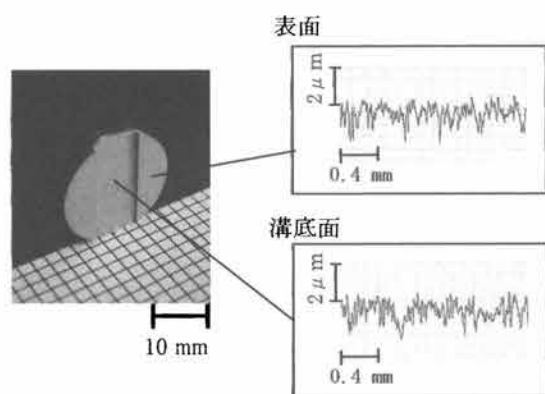


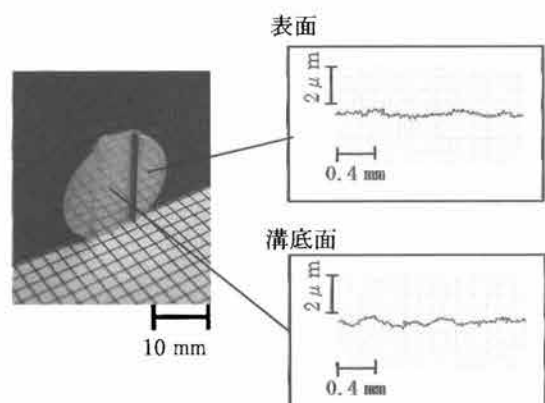
図14 2段階研磨法において溝深さ/強磁性材粒径の比を変化させたときの表面部と溝底部の表面粗さの関係
 (第一段階研磨時間: 10min , 第二段階研磨時間: 10min)

し、最終的には $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m Rz}$ の表面粗さに向上した。図5に示すように $115 \mu\text{m}$ の強磁性材を用いて溝深さ 1.0mm の第一段階研磨を行ったとき、溝底面の表面粗さを向上させることができなかったが、第二段階研磨時には溝底面と表面を同程度の表面粗さに向上することができた。この事象は次のように考えられる。溝深さが大きい場合、溝底面の相対運動は表面の相対運動と比較して小さい。しかし、第一段階研磨後は加工面の凹凸が小さいため、小さな相対運動であっても加工面の平滑化が可能であったものと考えられる。

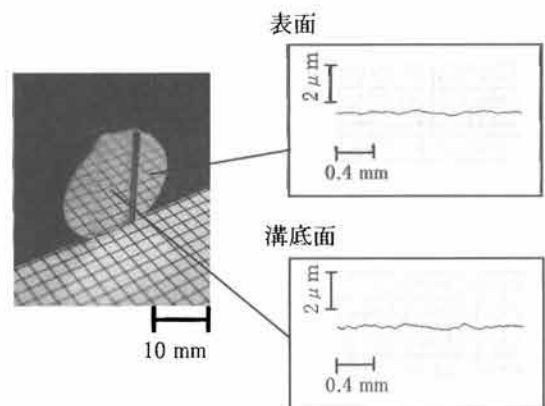
図14に溝深さ/強磁性材粒径の比を変化させたときの表面粗さを示す。第一段階研磨においては、溝深さ 1.0mm までは $260 \mu\text{m}$ の強磁性材を使用した。しかし、図5に示すように、 $260 \mu\text{m}$ を使用した場合、溝深さと強磁性材粒径の比が最も大きくなる溝深さ 1.5mm において溝底面は研磨されないた



(a) 加工前



(b) 第一段階研磨後(強磁性材粒径 260 μm を使用)



(c) 第二段階研磨後(強磁性材粒径 115 μm を使用)

図15 研磨前後の工作物の外観写真と粗さプロフィール
(溝深さ:1.0mm)

め、溝深さ 1.5mm については第一段階研磨時に 420 μm の強磁性材を使用したときの結果を参考データとして示した。溝深さ 1.5mm の場合には、図12の結果と同様に、コーナーR部の表面粗さは向上していないため、溝の中央部のみの測定値を示した。第一段階研磨後には、表面と溝底面の表面粗さは強磁性材粒径に対して固有の値になり、第二段階研磨後には表面粗さは 0.2~0.3 μm Rz 程度に向上した。図15

に研磨前と研磨後の工作物の写真と粗さプロフィールを示す。図示していないが、第二段階研磨後のエッジ部の丸み半径は、第一段階研磨後の形状からほとんど変化がみられなかった。

4. 結言

本研究で得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 溝底面の研磨には、溝深さに対する強磁性材の粒径が大きく依存しており、溝深さ/強磁性材粒径の比が大きくなると溝底面は研磨されない。また、研磨後の表面粗さは強磁性材の粒径に依存する。
- (2) 本加工法は段差が 1mm 程度の場合においても表面と溝底面の除去厚さの差が数 μm の範囲に加工可能な研磨方法である。
- (3) エッジ部の丸み半径の大きさは、強磁性材の粒子径に依存する。特に、溝深さが小さい場合には、溝深さよりも粒子径の小さい強磁性材を使用することで、エッジ部の過剰除去を抑制できる。
- (4) 強磁性材の粒径を変えて2段階研磨する方法を提案した。これによって、溝底面の表面粗さを更に向上することができる。

今後は狭い溝幅、アスペクト比の高い溝研磨への適用を行っていく予定である。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:磁気研磨法による曲面の平滑加工に関する研究(第1報,基礎実験),日本機械学会論文集(C編),53-485(1986)202.
- 2) 安斎正博:磁気研磨法の実用,熟処理,33-6(1993)339.
- 3) Masahiro ANZAI, Hisanori OTAKI, Etsuya KAWASHIMA and Takeo NAKAGAWA: Application for Deburring of Mechanical Parts Using Magnetic Abrasive Finishing, Int. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 27-3(1993)223.
- 4) 夏目勝之,進村武男,坂口克己:工作物振動方式磁気研磨法の研究(平面の磁気研磨特性と溝内面の精密仕上げ),日本機械学会論文集(C編),64-627(1998)4447.
- 5) 進村武男,山口ひとみ:磁気研磨法による曲面の平滑加工に関する研究-微小凹凸面金型への適用-,2001年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,(2001)250.
- 6) 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.
- 7) 安斎正博:研磨材スラリーを用いた磁気研磨法の実用,光技術コンタクト,31-12(1993)755.
- 8) 吉岡伸宏,番野茂樹,安斎正博,中川威雄:電気カミソリ刃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.
- 9) 山口ひとみ,進村武男,渡邊晋史:スラリー循環方式内面磁気研磨法に関する研究,精密工学会誌,67-3(2001)444.
- 10) 進村武男,山口ひとみ,渡邊将人: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) 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: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-,砥粒加工学会誌,46-8(2002)401.
- 12) 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の研磨性能に関する研究,日本機械学会論文集(C編),65-632(1999)1690.
- 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レ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.
- 14) 山本章裕,北嶋弘一,瀧上晃弘,渡辺昌知:バレル研磨における乾式および湿式の研磨性能,砥粒加工学会誌,42-3(1998)124.