

単純混合型磁性研磨材を用いた磁性工作物材料の磁気研磨

—R 溝内面の部分研磨法の提案とその研磨特性—

川久保英樹^{*1}, 土屋和博^{*2}, 佐藤運海^{*3}

Magnetic polishing for ferromagnetic materials using simply mixed magnetic abrasives

- Proposal of partial polishing method for R-groove and its polishing characteristics -

Hideki KAWAKUBO, Kazuhiro TSUCHIYA and Unkai SATO

磁気研磨法は、金型の仕上げ工程を自動化するための手法として期待されている。金型は磁性工作物材料であることが多く、磁気研磨法によって仕上げを行う場合、強磁性材粒子が工作物表面に磁気吸引されて残留するなどの問題点が指摘されている。そのため、磁性工作物材料の磁気研磨技術の確立が切望されている。

本研究の目的は、磁性工作物材料の R 溝およびテーパ R 溝の内面磁気研磨法の提案とその研磨特性の検討である。本報では、マスキングテープを用いた R 溝内面の部分研磨法を提案し、溝半径 R と強磁性材粒子半径 r との組み合わせが研磨特性に及ぼす影響を検討した。その結果、粒子半径 r は溝半径 R 未満であり、半径比 r/R が 1.0 に近づく程、良好な仕上げ面が得られることを明らかにした。さらに、テーパ R 溝を均一に内面研磨するための分割研磨法を提案し、溝内全体を同程度の表面粗さに仕上げることを可能にした。

Key words: magnetic polishing, polishing mechanism, particle brush, groove, polishing characteristics, edge shape

1. 緒言

近年、研磨技術は機械化・自動化が進められているが、微細金型の最終仕上げなどは、手作業で行われている場合が少なくない。このような背景において、磁気研磨法は、「磁力線のもつ物体透過作用を利用した加工法」、「柔軟な磁気連結粒子ブラシ（以後、粒子ブラシと呼ぶ）を利用した加工法」として注目されている¹⁾。著者らは単純混合型磁性研磨材を用いた磁気研磨法の研究を進めているが²⁾、この磁性研磨材は強磁性材粒子、砥粒、油脂を単純に混合して使用するため、研磨条件に合わせた独自の磁性研磨材を、容易に、安価に製作することが可能であるという利点を有している。これまでの研究によって、粒子ブラシを形成する磁性研磨材粒子や強磁性材粒子が研磨性能に大きな影響を及ぼすことが明らかにされている³⁾⁴⁾。

ところで、金型は磁性工作物材料であることが多く、磁気研磨法によって金型の仕上げを行う場合、研磨中の工作物は磁化されることになる。このため、研磨に必要な相対運動を与えた場合、粒子ブラシ先端部の粒子が工作物表面に磁気吸

引されて残留するなど、研磨面において十分な相対運動が得られないといった問題点が指摘されており⁵⁾、磁性工作物材料の磁気研磨技術の確立が切望されている。

本研究の目的は、磁性工作物材料の R 溝およびテーパ R 溝の内面磁気研磨法の提案とその研磨特性の検討である。ここでは単純混合型磁性研磨材を用い、溝の方向と同一の方向に振動運動のみを与える単純な方法によって研磨を行った。製作が容易な磁性研磨材と単純な構造の加工機を用いることによって、加工現場への適用も容易になることが期待される。

本報では、磁性工作物材料の R 溝内面およびテーパ R 溝内面の部分仕上げを目的として、マスキングテープを用いた部分研磨法を提案した。そして、研磨工具である粒子ブラシに着目してその研磨特性を明らかにし、テーパ R 溝の内面研磨への適用方法など、二、三の知見が得られたので報告する。

2. 実験方法

2.1 加工原理

図 1 に工作物振動式磁気研磨装置の概略図を示す。粒子ブラシと工作物との相対運動については、回転運動、振動運動、回転と振動の重畳、3 次元的運動などが挙げられるが、本研究では溝の方向と同一の方向に振動運動のみを与える単純な方法を採用した。一般にワイヤカット放電加工機によっ

*1 長野県工科短期大学校：〒386-1211 長野県上田市下之郷 813-8

Nagano Prefectural Institute of Technology

*2 セイコーエプソン(株)：〒399-0295 長野県諏訪郡富士見町富士土 1010

SEIKO EPSON Co., Ltd.

*3 信州大学：〒380-8544 長野県長野市西長野 6-ロ
Shinshu University

(学会受付日：2009 年 6 月 30 日)

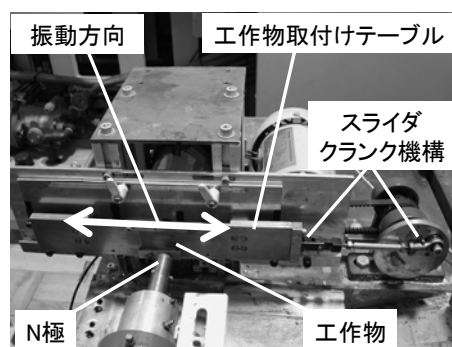
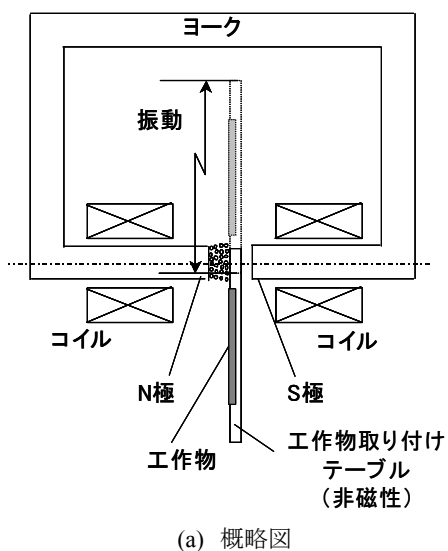
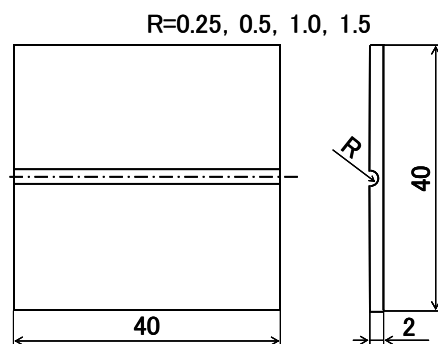


図1 工作物振動式磁気研磨装置



て製作された工作物は2次元的な自由曲面断面形状であり、形状を損なうことなく表面粗さのみを向上させるためには、振動運動による研磨が適しているといえる。振動テーブル上に直接取り付けられた工作物とN磁極には数mmの間隙があり、そこに粒子ブラシを形成させて研磨を行う。また、工作物表面への磁性粒子の磁気吸引による残留を抑制できるように、1回の往復動作で溝全面を擦過可能な構造になっている。

2.2 実験条件

図2に工作物形状を示す。溝半径Rが、0.25, 0.5, 1.0, 1.5mmの4種類について研磨特性を比較検討した。なお、工作物はワイヤカット放電加工機によってファーストカット後、セ

表1 実験条件

工作物	SKD11 初期面粗さ $5\sim6\mu\text{mRz}$ 溝半径 R (0.25, 0.50, 1.0, 1.5 mm)
工作物振動 磁極形状 加工間隙 起磁力 磁束密度 加工時間	振幅: 60mm, 振動数: 4 Hz 先端部: $10\times20\text{ mm}$ 2 mm (平面部からの距離) $1.5\times3000\text{ A}\cdot\text{turn}$ 0.35 T (磁極先端の中心部) 10 min
強磁性材粒子	ショットピーニング用鋼球, 4.0 g 平均粒子半径 r (0.058, 0.14, 0.21, 0.30, 0.40, 0.50, 0.70 mm)
砥粒 結合剤	WA#8000, 1.0 g オレイン酸, 3.0 mL

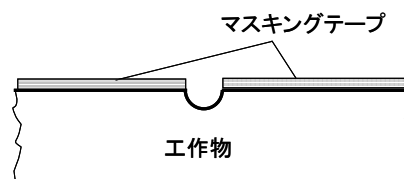


図3 部分研磨法の概略

カンドカット3回により製作した。

表1に実験条件を示す。工作物の材質はSKD11である。また、粒子ブラシを形成する強磁性材粒子には、7種類の粒子サイズを用意して研磨特性を比較した。本研究で使用する単純混合型磁性研磨材は、強磁性材粒子によって構成された粒子ブラシへ、切れ刃である砥粒を別体として供給する。そこで、砥粒が粒子ブラシから脱落することを防止するため、オレイン酸を粒子ブラシへの結合剤として供給した。なお、オレイン酸は潤滑液としての役割も果たしている。

R溝内の部分研磨を行うため、図3に示すようにR溝部のみを露出させて、それ以外はマスキングテープで保護する。マスキングは、測定顕微鏡を用いてエッジ部を拡大観察しながら手作業で行った。比較のため、マスキングテープは市販の厚さ0.25mmの絶縁ビニール製テープと厚さ0.2mmのアルミニウム箔製テープの2種類を用意した。

3. 実験結果および考察

3.1 マスキングによる部分研磨とエッジの保護効果

図4にマスキングテープの耐久時間について比較検討した結果を示す。絶縁ビニール製のマスキングテープは、40分以上の研磨時間に対しても平面部とエッジ部を保護して剥がれることはなかった。それに対して、アルミニウム箔製テープは1層の場合で研磨開始1.3分後に、2層の場合で3.6分後に粒子ブラシの切削作用によって除去されてしまった。この結果より、絶縁ビニール製のマスキングテープが保護材として適していることが明らかになった。

図5に半径0.5mmのR溝を部分研磨したときのエッジ近傍のSEM写真およびプロファイルを示す。ここでは、強磁性材

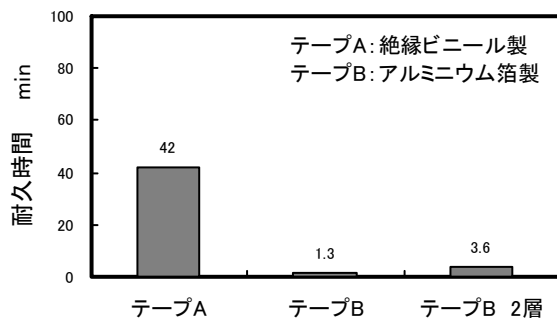
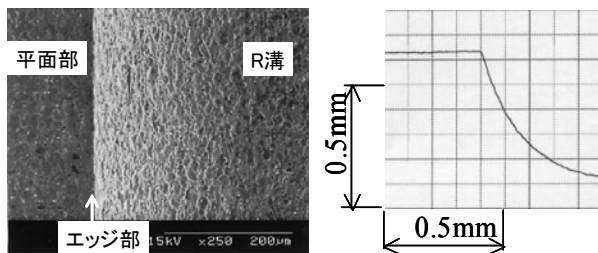
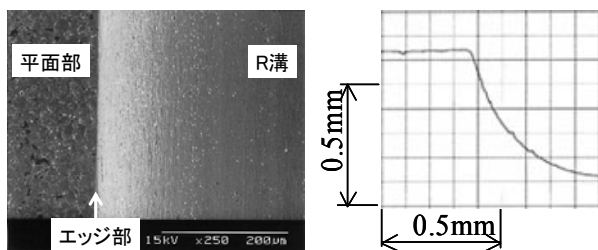


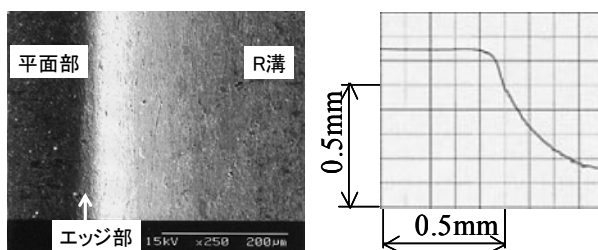
図4 マスキングテープの耐久時間



(a) 研磨前



(b) マスキングによる部分研磨

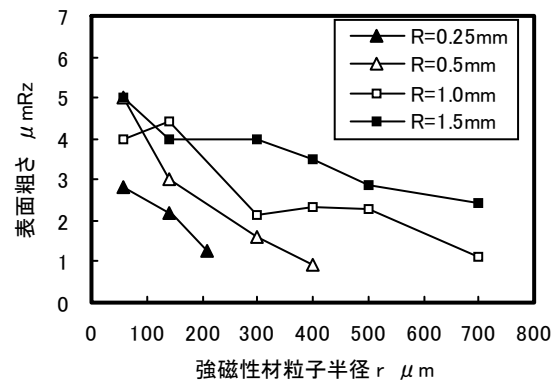


(c) マスキングなし

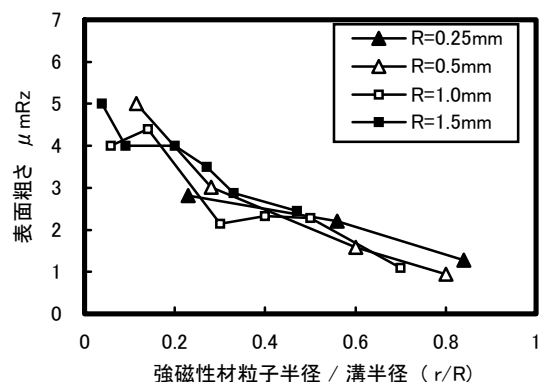
図5 R溝エッジ近傍のSEM写真およびプロファイル(溝: R=0.50mm, 粒子:r=0.40mm)

粒子半径 0.40mm を使用した結果を示した。図 5(a)は研磨前, (b)はマスキングによる部分研磨後, (c)はマスキングなしの研磨後である。マスキングなしの場合にはエッジ部の形状の崩れが観察されるが、マスキングをした場合には、エッジを保護しながら R 溝内の部分研磨が可能であることが明らかになった。また、マスキングをしたほうが溝面にはっきりとした研磨条痕が観察された。

この事象は次のように考えられる。表面に貼り付けたマスキングテープは非磁性であるため磁気抵抗となり、磁束はマスキングしていない溝部へ集中する。この結果、粒子ブラシの押付け力も溝部において増加し、研磨力が向上したことによ



(a) 溝半径 R および強磁性材粒子半径 r と表面粗さ



(b) 半径比 r/R と表面粗さ

図6 強磁性材粒子半径とR溝半径の組み合わせによる磁気研磨後の表面粗さ

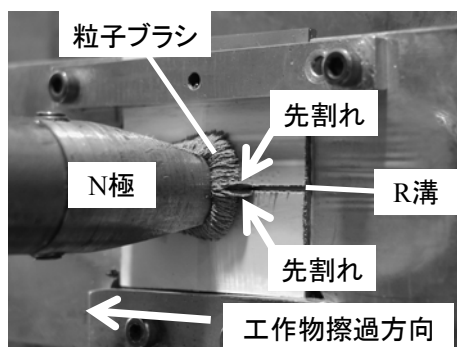
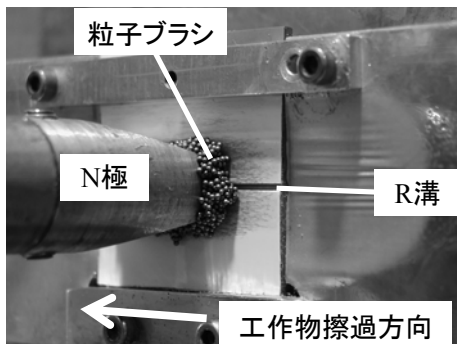
るものと考えられる。

3.2 溝半径 R と強磁性材粒子半径 r との組み合わせ

図 6(a)に溝半径 R と強磁性材粒子半径 r の組み合わせを変えて研磨したときの表面粗さを、図 6(b)に半径比 r/R (強磁性材粒子半径/溝半径) と表面粗さとの関係を示す。なお、強磁性材粒子半径 r が溝半径 R よりも大きい場合には溝内へ粒子が入らないため、溝半径値未満の粒子を使用した。また、溝半径 R が 1.5mm の場合については、強磁性材粒子半径 r が 0.70mm までの結果を参考として示した。

各溝半径において、表面粗さが最も良好になる強磁性材粒子半径との組み合わせがあり、そのときの粗さは $1\mu\text{m Rz}$ 程度であった。半径比 r/R と表面粗さとの関係から、半径比 r/R が 1.0 に近づくほど、表面粗さが良好になる傾向を示した。

このメカニズムを解明するため、半径比 r/R の異なる粒子ブラシを観察した。加工中の粒子ブラシの状態を図 7 に示す。これは溝半径 0.5mm に対して半径比が 0.28 と 0.80 の状態である。図 7(a)の半径比が 0.28 の場合、粒子ブラシ先端は溝エッジに沿った先割れ形状になり、粒子の一部は磁気吸引によってエッジに残留していた。溝に対する粒子半径が小さい場合、粒子が磁力線に沿って磁束密度の高いエッジ部へ集中

(a) 半径比 $r/R=0.28$ (粒子: $r=0.14\text{mm}$)(b) 半径比 $r/R=0.80$ (粒子: $r=0.4\text{mm}$)図7 粒子ブラシの形成状態 (溝: $R=0.5\text{mm}$)

しやすく、粒子ブラシ先端は先割れ形状になる。その結果、溝の全面への押付け力が不足して表面粗さが向上しなかったと思われる。また、粒子径が小さいために粒子同士の結合力が不足して、粒子の一部がエッジへ残留したものといえる。

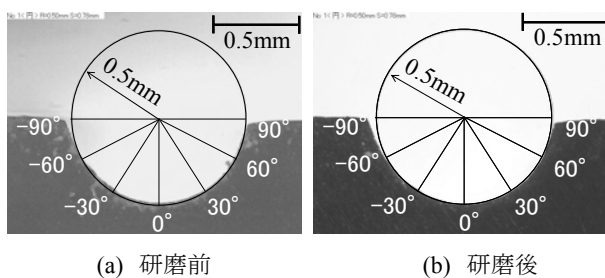
これに対して、図7(b)の半径比が0.80の場合、粒子ブラシ先端はエッジ部へ集中することなく溝の全面へ接触しており、溝内の強磁性材粒子は適度に循環して他の粒子と入れ替わりながら溝内を擦過していた。これは粒子半径が溝半径に近くなると粒子1個が溝の全面に接触しやすくなるためである。これによって粒子が研磨に十分に関与するため表面粗さが向上したものといえる。他の溝半径においても同様に、半径比が1.0に近いほど、粒子が溝の全面へ十分に接触するため表面粗さが向上したものと考えられる。

以上より、粒子半径が溝半径未満であり、半径比が1.0に近い粒子を使用すると良好な仕上げ面が得られることが明らかになった。

3.3 溝形状の変化について

図8に溝半径 R が 0.5mm の断面形状の一例を示す。研磨前後の R 溝形状の変化を検討するため、 R 溝の中心位置を溝位置 0° と定義し、 -90° から 90° の範囲における研磨前後の溝半径を測定した。ここでは、測定した半径値と図面半径値との差を形状誤差として定義した。

図9に形状誤差を示す。なお、形状誤差が正の場合は溝半径が図面半径値よりも大きく、負の場合は小さいことを示している。各溝半径ともに研磨後の形状誤差は研磨前よりも正の方向へシフトしており、前加工時の形状誤差を継承しながら



(a) 研磨前

(b) 研磨後

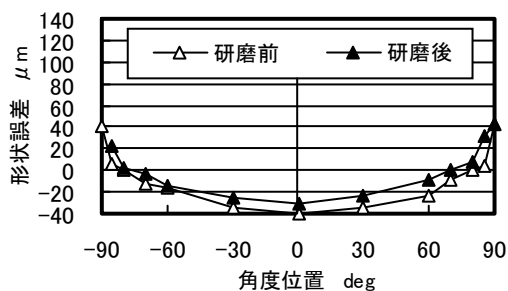
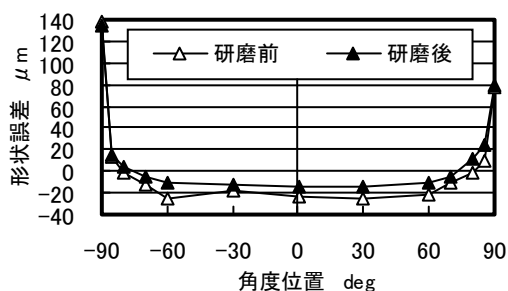
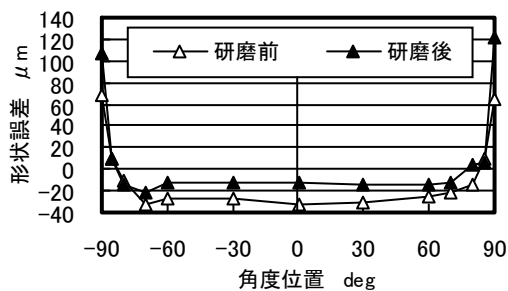
図8 溝半径 R が 0.5mm の断面形状の一例 (半径比 $r/R=0.80$, 粒子: $r=0.4\text{mm}$ 使用)(a) 溝: $R=0.25\text{mm}$ (半径比 $r/R=0.84$, 粒子: $r=0.21\text{mm}$)(b) 溝: $R=0.5\text{mm}$ (半径比 $r/R=0.80$, 粒子: $r=0.4\text{mm}$)(c) 溝: $R=1.0\text{mm}$ (半径比 $r/R=0.70$, 粒子: $r=0.7\text{mm}$)

図9 研磨前後の形状誤差

ら均一な除去が行われている。この結果は、磁気研磨が形状精度を向上させるよりも平滑化を目的とした加工法であることを示している。

図10に、図9におけるシフト量を研磨による除去量として整理した結果を示す。エッジ部近傍は測定誤差が大きくばらついているが、除去量は $10\mu\text{m}$ ~ $20\mu\text{m}$ であった。 R 半径が 1.0mm の場合、除去量が最も大きくなった。この事象は次の

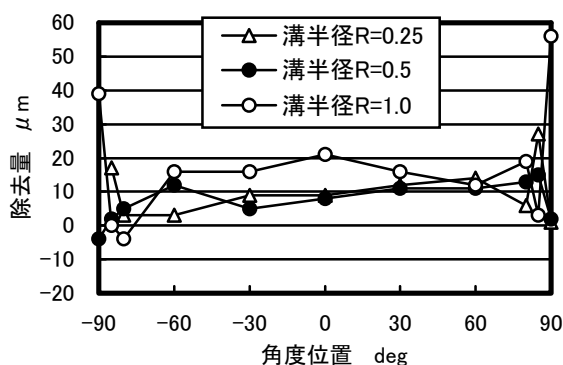
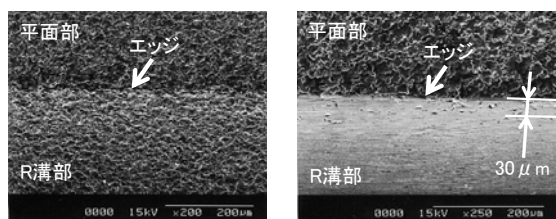


図 10 溝位置と除去量との関係



(a) 研磨前

(b) 研磨後

図 11 エッジ部近傍の SEM 写真(半径比 $r/R=0.80$, 溝半径 $R=0.5\text{mm}$, 25° 傾斜撮影)

ように考えられる。これまでに、強磁性材の粒子径、すなわち体積が大きくなると、粒子 1 個に作用する磁気力も増加するため、研磨による除去量も増大することが明らかにされている⁶⁾。本実験においてもとくに強磁性材粒子の体積が大きくなる溝半径 $R=1.0\text{mm}$ のときに、同様の傾向を示した。

エッジ部近傍の R 溝面の SEM 写真を図 11 に示す。これは溝半径 R が 0.5mm の場合の事例であるが、エッジから $30\mu\text{m}$ の範囲において、研磨面への付着物が観察された。このエッジから $30\mu\text{m}$ までの角度位置は、 $86^\circ\sim 90^\circ$ の範囲であり、図 10 のエッジ近傍のばらつきは、この付着物によるものといえる。以上から、本研磨法は $\pm 85^\circ$ の範囲において、一定の除去量で研磨可能であることを実験的に明らかにした。

4. テーパー R 溝の内面研磨への適用

ワイヤカット放電加工機によって製作されたテーパー R 溝内面の部分研磨を行った。図 12 にテーパー R 溝の形状を示す。テーパー角度は 1.57° 、溝半径は O 部 0.25mm 、A 部 0.39mm 、B 部 0.53mm 、C 部 0.66mm 、D 部 0.80mm である。なお、基本的な研磨条件は表 1 と同一である。

4.1 非磁性工作物材料(SUS304)の磁気研磨

磁性工作物材料(SKD11)の研磨結果と比較するために、非磁性工作物材料(SUS304)の溝内面研磨を行った。図 13 に各溝位置の表面粗さを示す。ここでは、O 部の溝半径 0.25mm よりもやや小さな粒子半径 0.21mm の強磁性材粒子を使用した。非磁性工作物材料の場合には、粒子ブラシの先割れは観察されなかった。その結果、半径比 r/R に関係なく、同程度の表面粗さに研磨されている。

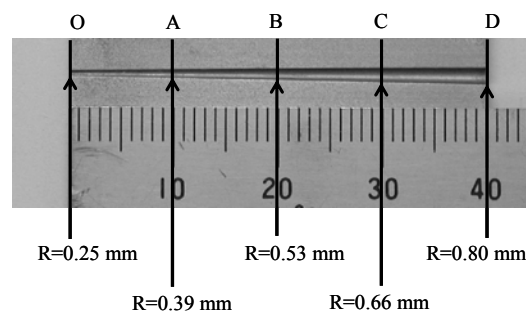
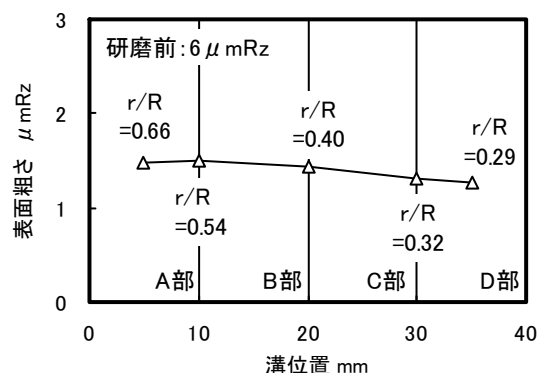
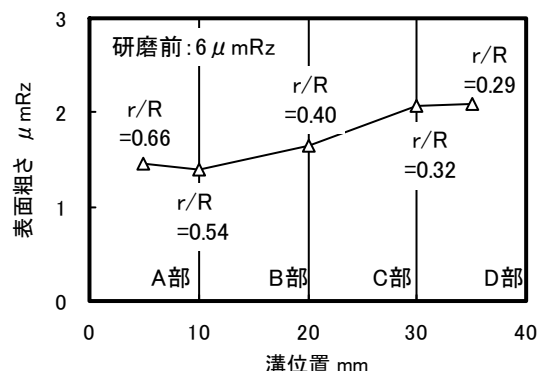


図 12 テーパー R 溝の形状

図 13 各溝位置の研磨後の表面粗さ(SUS304, 強磁性材粒子 $r=0.21\text{mm}$ を使用)図 14 各溝位置の研磨後の表面粗さ(SKD11, 強磁性材粒子 $r=0.21\text{mm}$ を使用)

4.2 磁性工作物材料(SKD11)の磁気研磨

前節と同様に粒子半径 0.21mm の強磁性材粒子を使用して、磁性工作物材料(SKD11)を研磨した。図 14 に各溝位置の表面粗さを示す。テーパーの溝半径が大きくなるにつれて、前加工面を十分に除去できず、表面粗さが大きくなる傾向を示した。この事象は、半径比 r/R が小さくなり、粒子ブラシが先割れ形状になって溝内面に十分に接触しなかったためといえる。この点は非磁性工作物材料との大きな違いである。

そこで、テーパー R 溝内面全体を均一に仕上げることを目的として、溝内面の分割研磨法を提案した。この方法では、工作物取り付け位置を変えて研磨区間を分割し、研磨区間ごとに最適な粒子径の強磁性材粒子を使用する。図 15 に分割研

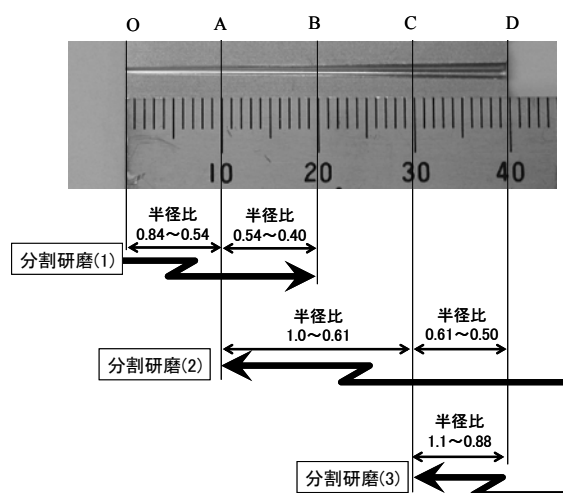


図15 分割研磨の方法

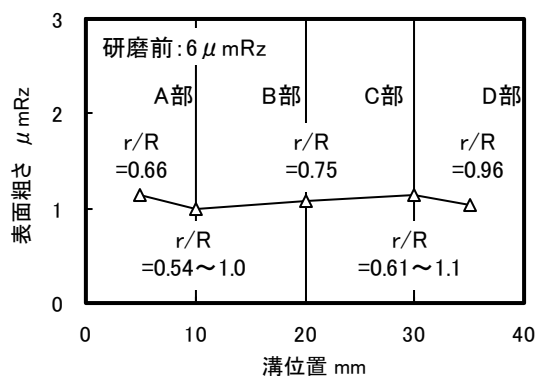


図16 分割研磨法によって研磨したときの表面粗さ

磨法の一例を示す。ここでは、3分割して研磨する方法について述べる。まず、分割研磨(1)として、OからBまでの区間を粒子半径 r が 0.21mm の強磁性材を使用して研磨する。次に、分割研磨(2)として A から D までの区間を粒子半径 r が 0.40mm の強磁性材を使用して研磨し、最後に分割研磨(3)として C から D までの区間を粒子半径 r が 0.70mm の強磁性材を使用して研磨する。

この分割研磨法によって、溝半径に対して可能な限り適正な半径比の強磁性材粒子を用いて、テーパ R 溝内面を研磨できるようになる。ここで、A-B 区間は分割研磨(1), (2)の2回、C-D 区間は分割研磨(2), (3)の2回、粒子ブラシが研磨面を擦過することになるが、半径比が小さい場合には十分な研磨が行われないため、溝内面の過剰研磨は行われなかったと考えられる。

図16に分割研磨法によってテーパ R 溝内面を研磨したときの表面粗さを、図17に溝内面の SEM 写真を示す。各部ともに前加工面が除去され、同程度の表面粗さに研磨することができ、分割研磨法の提案を実証することができた。

5. 結 言

単純混合型磁性研磨材を用いてワイヤカット放電加工機で製作された磁性工作物材料の R 溝内面の部分研磨を行っ

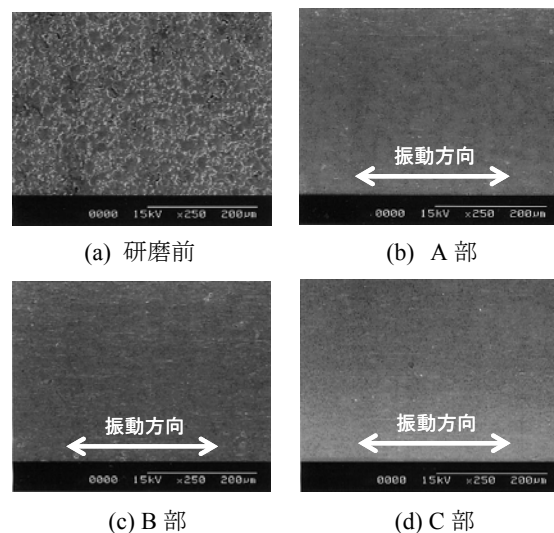


図17 テーパ R 溝の分割研磨 (SKD11)

た。得られた成果をまとめると次のとおりになる。

- (1) 市販の絶縁ビニール製テープをマスキングテープとして使用し、R 溝内面のみを露出させて部分研磨する手法を提案した。また、マスキングによるエッジの保護効果についても明らかにした。
- (2) 溝半径 R と強磁性材粒子半径 r との組み合わせについて検討した。その結果、粒子半径が溝半径未満であり、半径比 r/R が 1.0 に近い粒子を使用すると良好な仕上げ面が得られることが明らかになった。これは粒子半径が溝半径に近づくことによって、粒子が溝の全面へ十分に接触して研磨に関与するためである。
- (3) 半径比 r/R が 1.0 に近い良好な組み合わせで研磨した結果、溝内面をほぼ均一に除去していることが確認された。
- (4) 磁性工作物材料のテーパ R 溝内面を均一に仕上げるため、研磨区間ごとに最適な粒子径を用いる分割研磨法を提案した。そして溝内面全体が同程度の表面粗さに研磨できることを検証した。

6. 参考文献

- 1) T. Shinmura: Magnetic Field-assisted Machining Process and Its Industrial Applications, Proceedings of the Spring Meeting of Japan Society of Precision Engineering 2004, (2004) 915 (in Japanese).
- 2) H. Kawakubo, et al.: Internal Polishing Tubes using Simply Mixed Magnetic Abrasives, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 43,2 (1999)75(in Japanese).
- 3) H. Kawakubo, et al.: Influence of the Particle Brush on Magnetic Polishing Performance in Groove Bottom and Edge, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 47, 3(2003) 141 (in Japanese).
- 4) H. Kawakubo, et al.: Consideration on Mechanism of Polishing Force in Magnetic Polishing Method Using Loose Abrasives, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 47, 12 (2003) 672 (in Japanese).
- 5) S. Yin, et al.: Study of Magnetic Field-assisted Machining Process for Ferromagnetic Metallic Materials -Development of New Magnetic Abrasives and Its Performance-, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 46, 3 (2002) 141 (in Japanese).
- 6) H. Yamaguchi, et al.: Study on a New Internal Finishing Process by Application of Magnetic Abrasive Machining (4th Report), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, 65, 632 (1999) 1690 (in Japanese).