

# 磁気研磨法による段付き円筒面の精密仕上げ

進村武男\*

## 1. はじめに

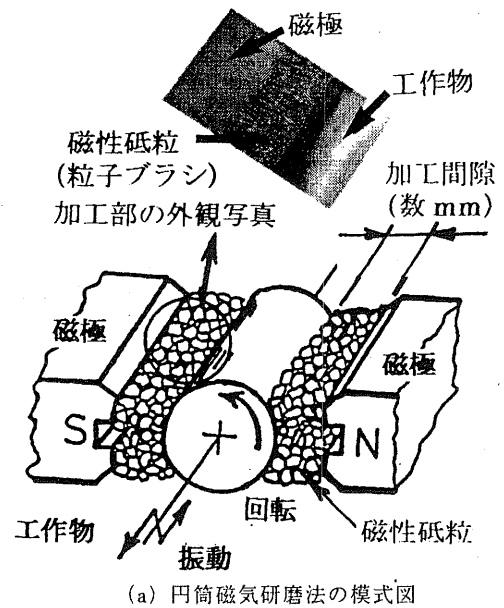
磁場（磁力線）を利用して磁性粒子同士を磁気的に結合させると粒子ブラシが形成される。この粒子ブラシの変形挙動は従来のブラシ仕上げに用いられるナイロンブラシ等と比べると著しくフレキシブルな挙動をする。粒子ブラシは加工域に挿入された工作物形状に倣って変形・分離して加工面に接触し、加工に関与する。工作物が排出されると再び粒子同士が結合・連結して粒子ブラシを再形成する。この特徴的な粒子ブラシは磁場を利用する『磁気研磨法<sup>1)</sup>』において初めて実現できるものである。

本稿は、磁気研磨法を特長づける粒子ブラシの挙動について述べた。次に、段付き円筒面の精密仕上げに適用し、その加工特性と加工機構を明らかにした。最後に、粒子ブラシがもつ特長を明確にしている。

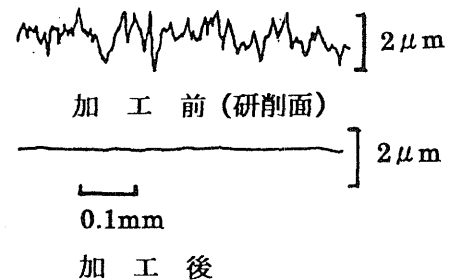
## 2. 磁力結合された粒子ブラシの特長

単純形状をした円筒外面の磁気研磨法を基にして粒子ブラシの特長を考える。図1(a)の模式図と粒子ブラシの外観写真が示すように、数mmの加工間隙（磁極と円筒面の間隔）に充填された磁性砥粒（磁性粒子）はN-S磁極間の磁力線に沿って整列し、粒子同士が磁気吸引力を受けて数珠繋ぎ状に結合し、粒子ブラシを形成する。このブラシは粒子から構成されているためフレキシブルな変形挙動をするとともに、粒子間は磁気吸引力で繋がっているため簡単に分離・連結を可逆的に繰り返すことができる。

この粒子ブラシは挿入された工作物形状に倣って容易に変形・分離して、加工域の磁場分布（磁



(a) 円筒磁気研磨法の模式図



(b) 表面粗さプロフィール

[研磨条件] 工作物：SK4，焼入れ鋼，直径30mm，長さ45mm；  
磁性砥粒：5 $\mu$ mのWA砥粒を鉄粉で焼結した平均粒径50 $\mu$ mの専用磁性砥粒；  
加工液：不水溶性研削液2.5wt%；  
加工間隙：1mm；  
工作物回転周速度：31m/min；  
工作物の振動：振動数15Hz，振幅1.5mm；  
加工時間：30s；  
加工域の磁束密度：1.2T；  
磁極形状寸法などのほかの条件：文献1)を参照

図1 円筒磁気研磨法の模式図と加工前後の表面粗さプロフィール

力線分布)に従った新たな粒子ブラシを形成し直し。そして、ブラシ先端の磁性砥粒によって工作物表面の精密仕上げが実現する。工作物が排出されると再び粒子同士が磁気吸引力を受けて連結し直し、粒子ブラシを再形成する。加工中、粒子ブラシはこの挙動を繰り返しながら加工に参与する。これまでの研究によれば、数 mm から十数 mm の加工間隙であっても  $0.1 \mu\text{mRy}$  オーダーの精密研磨面が得られる<sup>1),2)</sup> (図 1 (b))。

以上の事象から、粒子ブラシを加工の基本とする磁気研磨法の特長は、工作物の形状精度を維持しながら表面粗さを改善できる新しい加工法になり得るものと推論される。この事象を図 2 の段付き円筒面の磁気研磨加工を基にして詳述する。

図 2 において、磁性粒子から構成される粒子ブラシは基本的にフレキシブルな挙動をもつため、円筒面段差の山部、谷部、山と谷の側面部にほぼ等しい状態で工作物表面と接触する。その加工圧力は磁性粒子に作用する磁力に左右される。この磁力の大きさは、磁性粒子の粒径と磁化率、磁場強度とその変化率の積に比例する<sup>1),3),5)</sup>。磁性粒子の粒径と材質が決まっておれば、加工圧力は磁場強度とその変化率の積、すなわち、加工域の磁場分布に左右される。

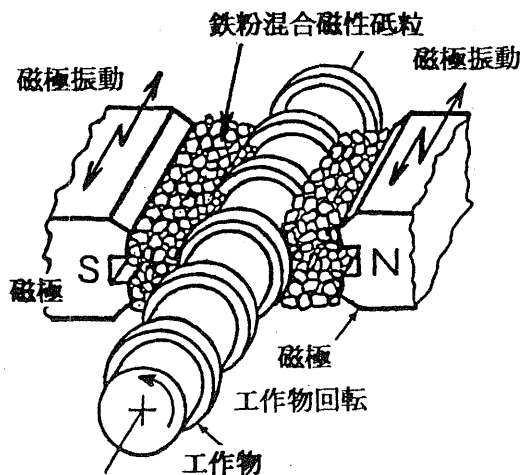


図 2 段付き円筒面の磁気研磨の模式図

いま、加工間隙を円筒の段差寸法に比べて比較的大きい値に設定すれば、加工域の磁場分布は山部と谷部において極端に違わず、粒子ブラシの加工圧力をほぼ等しくすることができる。その結果、円筒面全面が同等な加工圧を受け、ほぼ等しい精密研磨面が得られるものと推定される。

このような粒子ブラシの特長は磁場の利用によって初めて実現できるものであり、連続した弾性体から成り、根元を必要とするナイロンブラシ等を用いたブラシ加工法では期待できない事柄である。この粒子ブラシがもつ特長によって、数 mm の段差を有する円筒面であっても、その形状(寸法)精度を維持しながら、かつ表面粗さを改善できる新しい精密加工法として磁気研磨法が位置づけされるものと期待される。

### 3. 実験装置および実験方法

段付き円筒面を精密仕上げするために設計製作した磁気研磨装置は、N-S磁極先端を偏心カムと直動ベアリングを用いて加振し、磁極を工作物円筒の軸方向に振動させるものである<sup>3)</sup>。工作物を旋盤チャックに固定し、 $48\text{min}^{-1}$ の低速度で回転させた。この理由は、将来、プラスチック成形用押し出しスクリーやボールねじのボール転動面の精密仕上げに磁気研磨法を適用する目的があり、工作物を高速回転させるとスクリーやボールねじのリードの影響によって磁性粒子が流動する現象を防止するためである。

実験に用いた工作物の形状・寸法を図 3 に、図 4 に磁極の形状・寸法をそれぞれ示す。段付き円筒工作物に対しては磁極の形状選定が問題となる。磁極エッジ部が直線状(ストレート)の場合(図 4 (a))には、加工域の磁場強度とその変化率は段差の山部(段上部)と谷部(段下部)とでは異なる<sup>4)</sup>。すなわち、段付き円筒の山部の加工間隙が小さくなり、加工間隙が大きくなる谷部に比べて磁場強度とその変化率は高くなる。磁性砥粒に作用

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 磁性砥粒を選定するための予備実験

すでに筆者らは、磁性砥粒（あるいは、通常の研磨材）に大径の鉄粉を混合して磁気研磨すれば、著しい研磨量増大効果が得られることを明らかにしている<sup>5)</sup>。この事象は、加工間隙を大きくすると磁場強度とその変化率が低下し、結果として磁性粒子の加工力が減少することを補正する効果をもっている。すなわち、磁場強度と磁場の変化率が所定値に達しなくとも粒子径を大きくすることによって十分な加工力が発生でき、精密表面研磨の実現が期待できることを意味している。

特に、本研究では、段付き工作物を用いるため、加工間隙を大きくしても研磨量の低下を防ぐことができ、高能率加工を実現できる条件設定が必要とされる。研磨量増大効果を実現するために大径鉄粉混合砥粒を使用することにした<sup>5)</sup>。

鉄粉には電解鉄粉（粒子径：330,510 $\mu\text{m}$ ）を、混合砥粒にはダイヤモンド粒子（粒子径：2~4, 8~16 $\mu\text{m}$ ）を用いた。図示していないが、研磨量は研磨時間に対してほぼ直線的に増大し、鉄粉径とダイヤモンド砥粒径がともに大きくなると研磨量も増大する傾向を示した。この現象は一般の砥粒加工において観察される作用粒子の粗粒化に伴う加工量増大現象と同じであり、さらに、前述したように磁性粒子の大径化による加工力の増大効果が加味されたものと考えられる。

加工後の表面粗さは鉄粉径とダイヤモンド砥粒径が大きいほど粗くなる。この事象も砥粒加工における表面粗さと砥粒径の関係と同様である。本研究では、段付き工作物の前加工表面が消滅し、山の部分と谷の部分とでほぼ等しい磁気研磨固有の仕上面粗さ（本実験条件では、2.7 $\mu\text{mRy}$ ）になれば、加工の目的は達成したものと考え、この時点で加工を中止することにした。多くの実験の場合、この研磨時間はほぼ10分間であった。

この研磨時間であれば、工作物の段上部および段

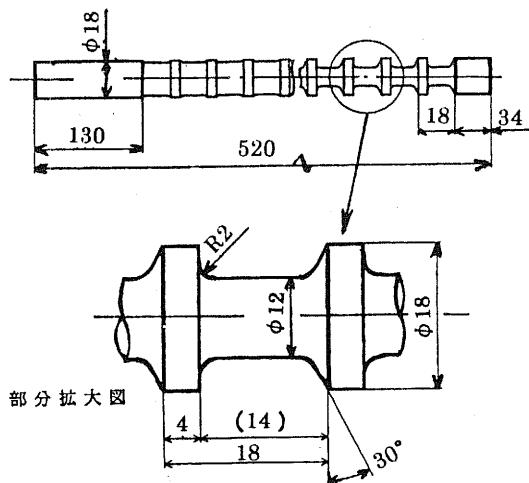


図3 実験に用いた工作物の形状と寸法 [材質：SS400]

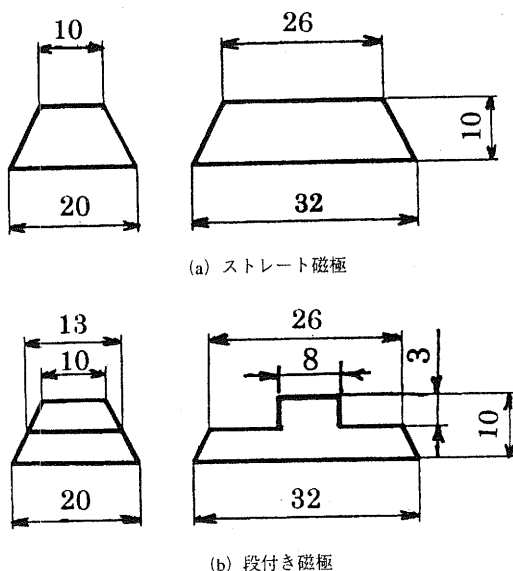


図4 実験に用いた磁極の形状と寸法 [材質：SS400]

する磁力（加工力）は磁場強度とその変化率の積に比例して決まるため<sup>5)</sup>、山部と谷部では加工力に差が生じる。その結果、加工特性が異なると考えられる。

これを避けるために、図4(b)に示す段付き磁極を製作して実験した。この場合、工作物の段上部・段下部・段側面と磁極との間隙を3mmに設定できるような段付き磁極の寸法形状とした。

下部の前加工面は除去されて、磁気研磨固有の表面粗さに加工される。10 分間加工したときの工作物直径を測定して直径減少量とした。従って、以下の実験では鉄粉径=510 μm, ダイヤ砥粒径=8~16 μm を使用し、形状精度に関係する因子として研磨量（工作物直径減少量）を取りあげて検討を進めた。

#### 4.2 段付き円筒とストレート磁極を用いた実験

図 5 に、段付き円筒とストレート磁極を用いたときの実験結果を示す。図 5 (a) はコイルへの励磁電流をパラメータとして加工間隙（磁極と段付き円筒段上部の間隙）が磁束密度に及ぼす影響を示している。段上部（山部）の加工間隙は小さいために磁束密度の値は大きく測定されている。

図 5 (b) に、励磁電流 2.5A における段付き円筒の

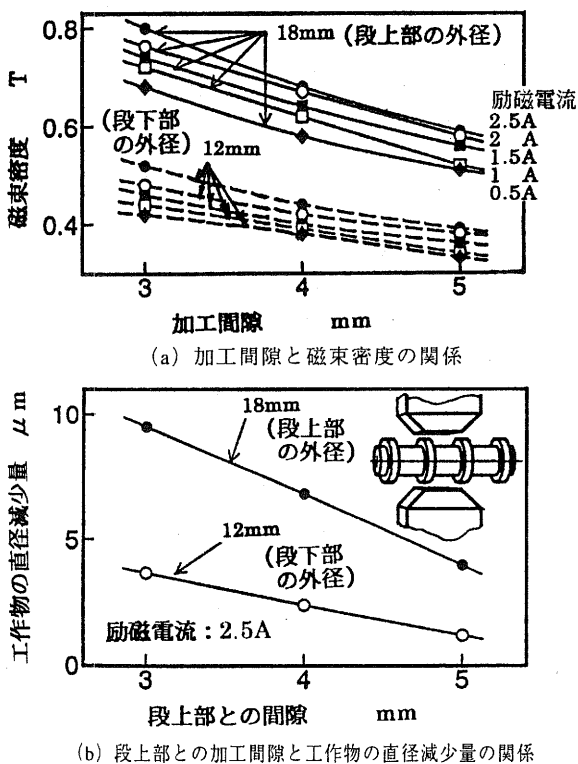


図 5 加工間隙が磁束密度と工作物の直径減少量に及ぼす影響

【研磨条件】 工作物：段付き円筒，SS400，寸法は図 3 を参照；ストレート磁極，図 4 (b) を参照；その他の条件は下記を参照

加工液：不水溶性研削液 2 mL；加工間隙：3 mm；工作物回転数：48 min<sup>-1</sup>；振動数 5 Hz，振幅 4 mm；磁極形状寸法：ストレート磁極：図 5 (a) を参照；鉄粉混合ダイヤ砥粒：鉄粉/8/16 μm ダイヤ砥粒=3/2 wt%，供給量 25 g；工作物前加工面粗さの設定：# 240 研磨紙仕上げ，2.1 μm Ry

段上部（山部）と段下部（谷部）の工作物直径減少量を示す。段上部の研磨量が大きいことは磁束密度の傾向と同様であり，加工間隙が増大すると研磨量も減少する。しかしながら，本実験では山部と谷部の段差寸法（直径の 1/2）が 3mm と大きいにもかかわらず，山部と谷部の研磨量の差は，加工間隙 3mm のときで 6 μm，間隙 4mm のときで 4 μm，間隙 5mm のときで 2.5 μm になっている。すなわち，工作物の直径差が数 mm であっても磁気研磨加工による形状（寸法）精度の誤差は数 μm 以下に抑えられることがわかる。

#### 4.3 段付き円筒と段付き磁極を用いた実験

図 6 に段付き円筒と段付き磁極を用いたときの実験結果を示す。図 6 (a) は，加工間隙（磁極と段付き円筒段上部の間隙）が磁束密度と工作物直径

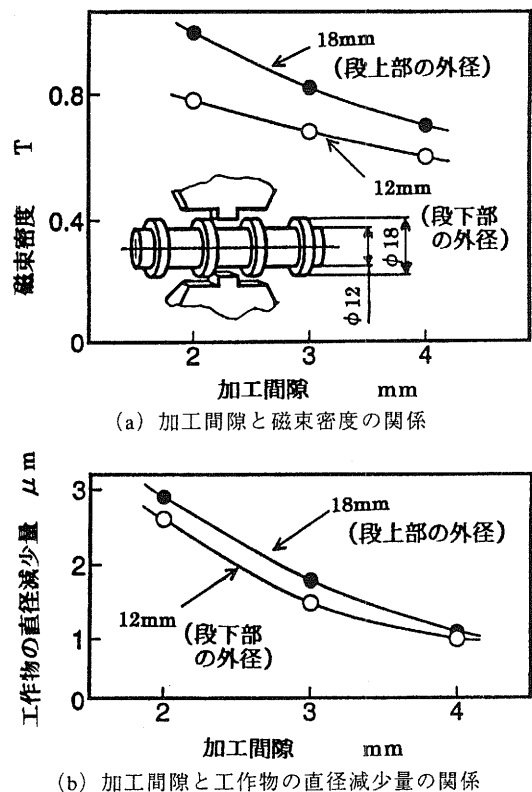


図 6 加工間隙が磁束密度と工作物の直径減少量に及ぼす影響

【研磨条件】 工作物：段付き円筒，SS400，寸法は図 3 を参照；段付き磁極，図 4 (b) を参照；励磁：2.5A；その他の条件は図 5 を参照

減少量に及ぼす影響である。図4(b)に示した段付き磁極のうち、工作物谷部直径12mmのときの結果である。段付き磁極を用いたため加工間隙は段付き円筒の段上部(山)と段下部(谷)とでほぼ同じ値に設定される。その結果、段上部(山)と段下部(谷)における磁束密度の差は図5の場合に比べて著しく小さくなることがわかる。

図6(b)に、励磁電流2.5Aのときの段上部(山)と段下部(谷)の工作物直径減少量を示す。この場合の山部と谷部の研磨量の差は $0.3\mu\text{m}$ になっていることがわかる。この $0.3\mu\text{m}$ の寸法差を形状精度として問題視しない部品も多いと考えられる。従って、磁極形状を工作物形状にほぼ合わせて磁気研磨加工できる場合には、3mm程度の段差寸法を有する円筒面に対しても形状精度誤差をサブミクロン以下に維持して、表面粗さを改善できる新しい表面仕上げ技術として磁気研磨法が位置づけられるものと期待できる。

なお、加工面は全面にわたって、図1(b)の加工面粗さプロフィールが示すように $0.1\text{--}0.2\mu\text{mRy}$ の鏡面が得られている。

以上の結果から、ストレート磁極の使用に拘っていた従来の考え方を改めて、段付き円筒には段付き磁極の使用が得策であることを明らかにすることができた。

## 5. おわりに

得られた成果を要約すると次のようになる。

- 1) 磁気の援用(磁気研磨法)によって実現できる粒子ブラシは工作物形状に倣ってフレキシブルに変形しながら加工に関与できる独特なブラシ挙動を示す。この粒子ブラシの挙動を基にして磁気研磨法の特長について考察した結果、加工前の工作物形状をほぼ保ちながら、表面を平滑化できる新しい加工法として期待できることを

推論した。

- 2) この推論を実験により確認するために、段付き円筒面の磁気研磨実験を行った結果、ストレート磁極を使用した場合の寸法誤差は $2\sim 3\mu\text{m}$ であるが、段付き磁極の使用によって寸法誤差をサブミクロンに低減できることがわかった。
- 3) 以上のことから、磁気研磨法の特長は、工作物の形状精度維持能力と、面粗さ改善能力を併せもつ新しい独特な加工法であり、具体的な部品、例えば、ボールねじのボール転動面やプラスチック成形用押出しスクリュウ表面、あるいは複雑な円筒形状を有する部品表面の精密仕上げに磁気研磨法が適用できることを示唆した。

## 謝 辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成が契機となって開始できたことを記し、厚くお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 進村武男：磁気研磨，機械技術，44,1(1996)49. 及び，磁気研磨法の現状と課題，機械と工具，40,9(1996)16.
- 2) 進村武男，高沢孝哉，波田野栄十，会沢利夫：磁気研磨法の研究(第2報)－円筒外面の研磨特性，精密工学会誌，52,10(1986)1761.
- 3) 進村武男：磁極振動方式磁気研磨装置の開発とその研磨性能，精密工学会誌，54,11(1988)2170.
- 4) 進村武男，高沢孝哉，波田野栄十：磁気研磨法の研究(第1報)－加工原理と二，三の研磨特性，精密工学会誌，52,5(1986)851.
- 5) 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(ステンレス鋼円管内面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)，59,560(1995)1261.