磁性流体研磨の研究*
(第2報, 浮子を用いた円筒端面の研磨特性)加藤 康司^{*1}, 梅原 徳次^{*1}, 馬場 祥孝^{*2}Magnetic Fluid Grinding
(2nd Report, Grinding Properties of a Cylinder End with a Float)

Koji KATO, Noritsugu UMEHARA, and Yoshitaka BABA

The grinding properties of an aluminum alloy cylinder end with a float were experimentally studied. Only the contact interface between the cylinder end and the float was ground, and a flat ground surface and sharp edge at the cylinder end were obtained. The removal rate with the float was 360 times larger than the removal rate without the float. The maximum removal rate was 3.38×10^{-3} mm³/m. The removal rate was observed as a function of the initial grinding load, revolution speed, abrasive grain concentration and abrasive grain size. It was concluded that the end of an aluminum cylinder could be ground effectively and accurately shape wise by magnetic fluid grinding with a float.

Key Words: Grinding, Magnetic Fluid, Float, Cylinder End, Aluminum Alloy

1. 緒 言

磁性流体中に混合した砥粒の受ける磁気浮揚力を利用した研磨として, 磁性流体研磨が研究されている。この磁性流体研磨を円筒端面に用いようとする試みは, 今中ら⁽¹⁾, 谷ら⁽²⁾⁻⁽⁵⁾, Umehara-Kato⁽⁶⁾らの研究がある。しかし, いずれの磁性流体研磨においても加工面の形状制御は, 面ダレ等が生じて不十分であり, 研磨率も小さかった。

それに対し最近, 加工圧力を高める補助工具として考案された浮子を導入することで, 大きな研磨率と有効な形状制御性を実現できることが球の磁性流体研磨において示された⁽⁷⁾。

そこで本研究においては, 浮子を用いた磁性流体研磨による円筒端面研磨法を考案し, 円筒端面研磨における研磨率と形状制御性を実験的に明らかにする。特に, 研磨面の形状, 研磨率および表面粗さに及ぼす浮子の寸法(厚さ, 穴の直径)の影響を明らかにする。さらに研磨率および表面粗さに及ぼす初期加工荷重, 回転速度, 砥粒の体積添加率および砥粒粒径の影響を明

らかにする。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を図1に示す。磁性流体中の浮子と砥粒は下方の磁石により磁気浮揚力を受け, 円筒試験片に押し付けられる。一方, 円筒試験片は回転し, その結果, 円筒端面が研磨される。浮子は上下方向には自由に運動できるが, 回転方向の運動は容器内側のキーにより拘束されている。それにより端面上のすべり距離は回転運動によるすべり距離と一致する。砥粒を含む磁性流体(2.3 ml)の液面高さは, 円筒試験片を磁

図1 実験装置概略図

* 平成元年8月25日 東北支部盛岡地方講演会において講演, 原稿受付 昭和63年9月28日。

^{*1} 正員, 東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

^{*2} 学生員, 東北大学大学院。

性流体に浸さない状態で磁石上面より9mmの位置にある。磁場は4mm幅の短冊形磁石を組合せた磁石により与えられる。この磁石は、ナイフエッジで支えられたベッドに取付けられ、加工荷重は、このベッドの下ロードセルによって測定される。

ロードセルで測定される荷重は、円筒試験片が直接受ける磁気浮揚力と砥粒および砥粒を介して伝えられる浮子の受ける磁気浮揚力の総和である。円筒試験片の受ける磁気浮揚力は加工荷重とはなり得ないので、ロードセルで測定された荷重から、あらかじめ測定されている試験片自身の磁気浮揚力を差し引いた値を初期加工荷重とする。

円筒試験片と浮子の形状を図2に示す。円筒試験片の研磨前の端面は、旋盤による切削面である。研磨体積は、研磨前後の円筒試験片の重量の減少量より算出され、円筒試験片の端面上のすべり距離は、見かけの接触面における平均の円周長さに回転速度と研磨時間を乗ずることにより算出される。表面粗さは、試験片端面の半径方向の粗さ曲線より求める。

実験条件を表1に示す。円筒試験片および浮子には、アルミニウム合金(A 5056; 99.5% Al)を用いる。

3. 実験結果

3.1 浮子の有無が研磨率に及ぼす影響 浮子(厚さ $t=1$ mm, 穴の直径 $d=6$ mm)がある場合とない場合における研磨時間と研磨量の関係を図3に示す。両者の初期加工荷重は、ともに0.14Nで等しい。ここで研磨率とは、単位すべり距離当たりの研磨体積であり、研磨能率を表す尺度とする。20min間の研磨において浮子なしの場合、研磨率は $1.10 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$ 以下であるが、浮子を用いた場合は $3.95 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$ であった。後述するように研磨率 W は初期加工荷重 L 、回転速度 v 、砥粒の体積添加率 ρ および砥粒粒径

図2 円筒試験片および浮子形状

$\bar{d}$ により変化する。本研究において測定された最大の研磨率は、 $3.38 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$ であった。また、図より浮子ありの場合には、研磨量は研磨時間に比例して増加していることがわかる。浮子ありの場合、円筒試験片の回転にともない砥粒を含む磁性流体が良好な循環をし、その結果、円筒試験片と浮子の接触面に砥粒が連続的に供給されたと考える。以後、浮子ありの場合のみにについて示す。

3.2 研磨面形状に及ぼす浮子の効果 研磨前および初期加工荷重 $L=0.59$ N, 回転速度 $v=20000$ rpmで4min 30s間研磨したときの円筒端面の粗さ曲線を図4に示す。研磨面においては、穴部分を除き、浮子が当たる部分は水平に研磨されており、面ダレは生じていない。

また浮子の穴の直径 d を3mmおよび9mmに変化させた場合の円筒端面の粗さ曲線を図5に示す。この図においても浮子の穴に対応する部分を除き水平に研磨されていることがわかる。

このような研磨面形状に及ぼす浮子の効果は、高加工荷重などの影響で円筒試験片と浮子の接触面に砥粒

表1 実験条件

Magnetic fluid	W-40 (Water-based) density; $1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (25°C) viscosity; $2.3 \times 10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (25°C)
Specimen	Al alloy (A5056)
Float	Al alloy (A5056)
Abrasive grain	GC grain (SiC)
Grain size	1.8 ~ 75 μm
Concentration	0 ~ 30 vol%
Sliding distance	2119.5 ~ 2967.3 m
Initial grinding load	0.10 ~ 1.02 N
Revolution speed	2500 ~ 20000 rpm

($v=9000$ rpm, $\bar{d}=38 \mu\text{m}$, $\rho=20$ vol%)

図3 研磨時間と研磨量の関係

が供給されないことによりおこる金属接触状態の場合を除いて、浮子の厚さあるいは初期加工荷重、回転速度、砥粒の体積添加率および砥粒粒径の各因子を変化させた場合においても確認されている。

3.3 研磨率に及ぼす諸因子の影響

3.3.1 初期加工荷重と浮子の形状の影響 図6に穴の直径 $d=6$ mm の浮子の厚さ t を変化させたときの研磨率と初期加工荷重の関係を、また図7に厚さ $t=1$ mm の浮子の穴の直径 d を変化させたときの研磨率と初期加工荷重の関係を示す。図6より浮子の厚さ $t=2$ mm と 3 mm の場合、研磨率は初期加工荷重とともに増加するが、ある荷重以上になると減少することがわかる。一方、 $t=1$ mm の場合、研磨率は初期加工荷重とともに増加することがわかる。図における黒塗のプロット点の条件において、研磨面に非常に光沢のある同心円状の線が見られた。このとき、円筒試験片と浮子の金属接触が生じていると考えられる。この金属接触は、加工圧力の増加に伴い接触面への砥粒

の侵入が困難になったためにおこると考えられる。

つまり、浮子の厚さが薄いほど金属接触のおこる初期加工荷重が高く、高研磨率が得られることがわかる。また、図7より浮子の穴の直径が大きいほど金属接触のおこる初期加工荷重が高く、穴の直径 $d=6$ mm の浮子を用いたときに高研磨率を得ていることがわかる。

したがって、高研磨率を得るための最適な浮子は厚さ $t=1$ mm で、穴の直径 $d=6$ mm の浮子であると考えられる。よって以下の研磨率に及ぼす諸因子の影響は厚さ $t=1$ mm、穴の直径 $d=6$ mm の浮子を用いて明らかにする。

3.3.2 回転速度の影響 初期加工荷重を変化させたときの研磨率と回転速度の関係を図8に示す。研

(b) 研磨面($d=6$, $t=1$ 浮子, $L=0.59$ N, $T=4.5$ min)
($v=20\,000$ rpm, $\bar{d}=38\ \mu\text{m}$, $\rho=20$ vol %)

図4 円筒端面の粗さ曲線

(a) $d=3$, $t=1$ 浮子 ($L=0.39$ N, $T=10$ min)
(b) $d=9$, $t=1$ 浮子 ($L=0.39$ N, $T=10$ min)
($v=9\,000$ rpm, $\bar{d}=38\ \mu\text{m}$, $\rho=20$ vol %)

図5 円筒端面の粗さ曲線

(厚さ t を変えた場合、穴の直径 $d=6$ mm)
($v=9\,000$ rpm, $\bar{d}=38\ \mu\text{m}$, $\rho=20$ vol %)

図6 初期加工荷重と研磨率の関係

(穴の直径 d を変えた場合、厚さ $t=1$ mm)
($v=9\,000$ rpm, $\bar{d}=38\ \mu\text{m}$, $\rho=20$ vol %)

図7 初期加工荷重と研磨率の関係

磨率は、回転速度とともに増加することがわかる。これは、高回転速度になるに従い砥粒を含む磁性流体の循環が良好になることによると考えられる。

3・3・3 砥粒の体積添加率の影響 初期加工荷重を変化させたときの研磨率と砥粒の体積添加率の関係を図9に示す。図より各初期加工荷重において高研磨率を得る最適な砥粒の体積添加率が存在することがわかる。

3・3・4 砥粒粒径の影響 初期加工荷重を変化させたときの研磨率と砥粒粒径の関係を図10に示す。図より各初期加工荷重において高研磨率を得る最適砥粒粒径が存在することがわかる。また砥粒粒径が小さいほど金属接触がおりやすいことがわかる。

3・4 表面粗さに及ぼす諸因子の影響

3・4・1 初期加工荷重と浮子形状の影響 穴の直径 $d=6$ mm の浮子の厚さ t を変化させたときの最大高さ粗さ $R_{\max}$ と初期加工荷重の関係を図11に示す。また、厚さ $t=1$ mm の浮子の穴の直径 d を変化させたときの最大高さ粗さと初期加工荷重の関係を図12に示す。図11より、最大高さ粗さは初期加工荷重によらず $3.5 \mu\text{m}$ 程度で一定であるが、金属接触が生じた場合には $9 \sim 16 \mu\text{m}$ と著しく大きな値になることがわかる。また図12より、浮子の穴の直径 d を変化させたときの最大高さ粗さも、金属接触の生じた場合は、 $14 \mu\text{m}$ の大きな値であるが、それ以外は、 $3.5 \mu\text{m}$ 程度で一定であることがわかる。したがって、表面粗さのためには、金属接触の生じない初期加工荷重と浮子形状が必要である。

3・4・2 回転速度および砥粒の体積添加率の影響
最大高さ粗さに及ぼす回転速度、砥粒の体積添加率

および砥粒粒径の各因子の影響については、3・3・1項において示された高研磨率が得られると考えられる厚さ $t=1$ mm、穴の直径 $d=6$ mm の浮子を用いて明らかにした。

最大高さ粗さは、金属接触の場合を除き $3.5 \mu\text{m}$ 程度で一定であり、回転速度および砥粒の体積添加率の影響を受けない。

3・4・3 砥粒粒径の影響 砥粒粒径と最大高さ粗さの関係を図13に示す。図より金属接触の場合を除き、砥粒粒径の増加とともに最大高さ粗さも増加していることがわかる。

4. 考 察

4・1 研磨面形状に及ぼす浮子の影響 従来の浮子を用いない円筒端面研磨においては、外周部ほど研磨された。それに対し本研究の研磨においては水平に

図9 体積添加率と研磨率の関係

図8 回転速度と研磨率の関係

図10 砥粒粒径と研磨率の関係

研磨されており面ダレは生じていない。この理由として次のことが考えられる。

砥粒を用いた研磨において、その研磨量に影響を及ぼす重要な因子としては、加工圧力とすべり距離があ

る。一般に、円筒端面研磨においては、面ダレが生じる原因として、端面内の加工圧力が一定である場合、端面内における周速の違いによるすべり距離の違いが考えられる。それに対し浮子を用いた磁性流体性研磨においては、すべり距離の違いによる面ダレが生じた場合、試験片と浮子の接触が端面内周部分に限られるため、内周部分の加工圧力が増加し、内周部分の研磨量が増加する。つまり、浮子を用いることによって、すべり距離の半径による違いが端面内の加工圧力の変化によって補われると考えられる。その結果、端面は水平に研磨されていると考えられる。

また、図6に示すように穴の直径を変化させた浮子を用いることにより円筒端面の中心部を任意の大きさで残した研磨ができる。

したがって、磁性流体研磨に浮子を導入することで端面研磨が可能と考えられる。

4・2 最適研磨条件 円筒試験片の研磨率は初期加工荷重とともに増加するが、さらに大きな初期加工荷重になると試験片と浮子の金属接触が生じる。このような金属接触が生じた場合、浮子による形状制御が不可能となる。したがって、高研磨率を得るためには、大きな初期加工荷重において、金属接触の生じない条件が必要となる。

本研究の場合、そのような条件は、図6、7の結果から、厚さ $t=1\text{ mm}$ 、穴の直径 $d=6\text{ mm}$ の浮子を用いた場合であった。つまり浮子の厚さを薄くし、穴の直径を大きくすることによって砥粒を含む磁性流体が良好に循環し、砥粒が円筒試験片と浮子の接触面に供給されやすくなるため、大きな初期加工荷重においても金属接触が生じないと考えられる。

また、図8、9、10の結果から金属接触が生じない条件において、大きな回転速度、最適な砥粒の体積添加率および最適な砥粒粒径において高研磨率が得られていることがわかる。

以上のことから、本研究において高研磨率を得るためには、厚さ $t=1\text{ mm}$ 、穴の直径 $d=6\text{ mm}$ の浮子を用いて、回転速度を高め、それぞれ最適な砥粒の体積添加率および粒径を用いて研磨すればよいと考えられる。

4・3 実際の加工荷重と初期加工荷重の関係 磁性流体の代わりに水を容器に入れて、円筒試験片を回転させた場合、浮子は端面に吸いつけられることが確認された。一方、磁性流体を用いて磁場なしの状態では研磨した場合、円筒試験片の研磨量は微小なものであった。また研磨面に金属接触は生じていなかった。

これらのことから試験片の回転運動に伴う試験片浮

(厚さ t を変えた場合、穴の直径 $d=6\text{ mm}$)
($v=9\,000\text{ rpm}$, $\bar{d}=38\text{ }\mu\text{m}$, $\rho=20\text{ vol }\%$)

図 11 初期加工荷重と最大高さ粗さの関係

(穴の直径 d を変えた場合、厚さ $t=1\text{ mm}$)
($v=9\,000\text{ rpm}$, $\bar{d}=38\text{ }\mu\text{m}$, $\rho=20\text{ vol }\%$)

図 12 初期加工荷重と最大高さ粗さの関係

($v=9\,000\text{ rpm}$, $\rho=20\text{ vol }\%$)

図 13 砥粒粒径と最大高さ粗さの関係

子間の圧力低下による浮子の受ける浮揚力は小さく、そのため、圧力低下の研磨量に及ぼす影響は少ないと考えられる。したがって加工荷重は、ロードセルで測定される磁気浮揚力である初期加工荷重とほぼ等しいと考えられる。しかし試験片回転時の試験片浮子間の砥粒層厚さは、初期状態よりも薄くなるため、回転時の浮子磁石間の距離は、初期状態よりも多少大きいと予想される。したがって実際の加工荷重は初期加工荷重よりも多少低めの値であると考えられる。

5. 結 言

アルミニウム合金において浮子を用いた円筒端面の磁性流体研磨が実用的に可能であることを明らかにした。具体的結論は、以下のとおりである。

(1) 浮子を用いることにより最大 3.38×10^{-3} mm³/m の研磨率が得られる。

(2) 浮子を用いることにより面ダレのない円筒端

面を得ることができる。

(3) 研磨率は一定の範囲内で、荷重と速度に比例して増加する。

(4) 研磨率が最大となる最適な砥粒の体積添加率と粒径がある。

終わりに、磁性流体を提供していただいたタイホー工業(株)に感謝する。

文 献

- (1) 今中・黒部・松島, 昭和56年度精機学会春期大会学術講演会論文集, (1981-3), 774.
- (2) 谷・仙波・河田, 生産研究, 35-12(1983), 531.
- (3) 河田・谷・高尾, 生産研究, 36-8(1984), 366.
- (4) Tani, Y. and Kawata, K., *Annals of CIRP*, 33-1 (1984), 217.
- (5) 高尾・谷・河田, 生産研究, 37-2(1985), 76.
- (6) Umehara, N. and Kato, K., *J. MMM*, 65(1987), 397.
- (7) 梅原・加藤, 機論, 54-503, C(1988), 1599.