遠心バレル研磨に関する基礎的研究 (第1報)*

——メディア装入率の影響——

山本章裕** 北嶋弘一*** 桜田康弘† 野呂田 進††

Study on Centrifugal Barrel Finishing (1st Report)
-Charging Ratio of Media -

Akihiro YAMAMOTO, Koichi KITAJIMA, Yasuhiro Sakurada and Susumu NOROTA

The centrifugal barrel finishing is done at various charging ratios of media. The media is made of aramid fiber of meta type containing abrasive grains of SiC in #120 and its shape is cylindrical (2.5mm in diameter and 4mm in length). The workpiece is a cold finished carbon steel bar (S45C in JIS, 32mm in diameter) sliced by 10mm in length and its sliced surfaces are finished in grinding or in sand paper finishing. It is confirmed that the stock removal rate increases with the decrease of charging ratio, and also that the surface roughness and the edge radius of workpiece show the same tendency as the stock removal. The amount of stock removals of workpieces finished in a barrel shows two inflection points. The maximum point appears nearly at 50vol% in charging ratio but the amount becomes larger than the maximum point as the charging ratio becomes less than 20vol%.

Key words: centrifugal barrel finishing, charging ratio, dry barrel finishing, stock removal

1. 緒 言

最近、ドライバレル研磨と称して、ナイロン等の高分子材料に砥粒を混入し、種々のメディア形状に成形したものをバレル研磨用のメディアとして用い、水やコンパウンドを使用しないで研磨する方法が実施されている。

このことは、従来のバレル研磨では、コンパウンドと水に工作物とメディアの摩耗粉が混合した廃水が生成されるが、ドライバレル研磨では、従来のバレル研磨機に工作物とメディアだけを装入して研磨するので、廃水処理や工作物の後処理もほとんど必要としないという利点を有していることによるものである。

しかし、コンパウンドと水を使用する従来のバレル研磨においては、十分な実績があるが、ドライバレル研磨に関しては実績がほとんど皆無に近い。このドライバレル研磨の普及には、従来のバレル研磨との研磨能力の比較が要求され、そのための試みもなされているが、基本的には従来のバレル研磨とドライバレル研磨では使用されるメディアの材質が全く異なるため、研磨性能を単純に比較することが困難であるというのが現実である。

すなわち、従来のバレル研磨では、水、コンパウンドおよびメディアの選定により、荒加工から鏡面仕上げまで研磨能力を変化させることができる。一方、ドライバレル研磨の場合においてもメディアの選定によって研磨能力を様々に変化させることができ、比較の仕方によって、いずれの研磨法も有利にも不利にもなることが可能である。また、同一のメディアを使用し、湿式と乾式と比較することも可能であるが、湿式用メディア

で湿式研磨を行えば問題はないが、ドライでは、工作物の損傷が激しくなり、実用には適さないという結果になる。一方、ドライ用メディアでドライ研磨を行えば問題はないが、湿式研磨では研磨能力が激減して、ほとんど研磨できないばかりでなく、メディアの材質によっては吸水性によって、使用が困難などの問題を生じる。

そのため、筆者らは従来の湿式バレル研磨とドライバレル研磨を比較していないが、遠心バレル研磨機を用いたドライバレル研磨において、メディアの選定によって、従来のバレル研磨と同等の仕上げが可能であることを明らかにした。さらに、ドライバレル研磨用メディアは、従来の焼成メディアとは異なり、そのメディアの大きさや形状だけでなく、混入されている砥粒粒度が研磨性能に影響を及ぼすことを明らかにし、湿式と乾式の研磨条件の相違が研磨結果に与える影響は、基本的には同様であることを確認した¹⁾。

遠心バレル研磨に関して理論的な研究²⁾³⁾はあるが、研磨条件と研磨結果について詳細に検討した研究はほとんど見当たらない。とくに、メディア装入率の影響に関しては、回転バレル研磨の結果による類推だけでは不十分である⁴⁾。そこで、本研究では、水とコンパウンドの影響を考慮しないでドライバレル研磨において、メディア装入率が研磨特性に及ぼす影響について実験的に検討した。

2. 実験方法

2.1 遠心バレル研磨法

遠心バレル研磨機は、タレット (Turret) と呼ばれる回転板に容器 (Barrel) を等間隔に偏心させ取り付けられたもので、タレットと容器がある回転数比でそれぞれ回転できるようになっている。すなわち、遠心バレル研磨はタレットを回転させることによって容器に遠心力を作用させ、容器を回転させることにより工作物とメディアに相対運動を引き起こさせて研磨する方法である。本研究では、タレットと容器の回転比は表1に示すように-1、すなわちタレットが1回転すると容器がその回転軸

* 原稿受付 平成8年7月25日

** 正 会 員 兵庫県立工業技術センター(神戸市須磨区行平町3-1-12)

*** 正 会 員 関西大学工学部(吹田市山手町3-3-35)

† 学生会員 関西大学大学院

†† 帝人(株)岩国事業所(岩国市日の出町2-1)

Table 1 Specification of centrifugal barrel finishing machine

Turret rotation	0-240rpm(variable)
Rotation rate of barrel to turret	-1
Distance between the center of turret and center of barrel	160mm
Barrel shape and number	Equilateral octagon(1.72φ)×4 Base side:46mm,Length:165mm

Fig.1 Centrifugal barrel finishing

Fig.2 Measurement of edge radius

に対して反対方向に1回転する。そのため、容器内の加速度分布は図1(a)のようにどの位置においても均一となり、メディアと工作物の混合体であるマス(Mass)は容器の自転にもかかわらず遠心力により図1(b)のようにタレットの回転中心から常に最も遠い位置となるように容器の片側に押し付けられて移動する。その結果として、タレットが1回転するとマスは容器の中を1回転(公転)することになる^{2),3)}。

研磨条件として、メディア装入率(メディア体積と容器容積の比)は20~50vol%とし、タレットの回転数は120~240rpmとした。また、工作物は1つの容器につき1個とし、工作物同士の接触による擦過痕の発生を避けるように配慮した。

2.2 工作物とメディア

工作物には、直径φ32mm、厚さ10mmの磨き棒鋼(S45C,HB262)の両端面に研削加工(約0.9μmRa)および研磨紙による鏡面仕上げ(約0.02μmRa)を施したものを使用した。また、実験に使用したメディアは、ナイロンよりも耐熱・耐摩耗性に優れるアラミド樹脂にSiCの砥粒を混入(混入率:50wt%)したφ2.5×L4mmの形状のドライバレル研磨用で、混入されている砥粒粒度は#120である。

2.3 研磨特性の評価

種々の研磨条件で工作物を所定の時間ドライバレル研磨を行い、その研磨量を電子天びんで、仕上面粗さを表面粗さ測定機で測定した。また、研磨後の工作物のエッジ部形状を輪郭形状測定機で測定し、エッジ部の丸味を図2のように定義して算出した。すなわち、ドライバレル研磨された工作物のエッジ部断面は、図2のように完全な円弧とはなっていないため、研磨前の理想的なエッジ先端から最も近い研磨後のエッジ輪郭までの

Fig.3 Relationship between finishing time and stock removal

距離 a を測定し、次式で計算したものをエッジ部の丸味半径 r とした。

$$r = \frac{a}{\sec \frac{\theta}{2} - 1} \quad (1)$$

さらに、研磨中におけるメディアと工作物の接触圧を測定するため、感圧フィルムを工作物表面に貼り付け、1分間の研磨後の感圧フィルムの色濃度変化を濃度計で測定して圧力に換算した。

3. 実験結果および考察

3.1 研磨量への影響

図3は、タレット回転数200rpm、メディア装入率20,30,50vol%で研削加工した工作物と研磨紙で鏡面に仕上げた工作物をそれぞれ研磨したときの研磨量の時間的推移を示したものである。

研磨量は研磨時間に比例して増加しており、メディア装入率の低い方が研磨量は大きくなっている。研磨量の大きいメディア装入率20vol%においては、研削面と鏡面の両面加工面性状による研磨量の相違はなく、ほぼ同等の直線を呈しているが、メディア装入率30vol%および50vol%においては仕上面粗さの大きい研削面の研磨量の方が鏡面のそれより増大することがわかる。

従来の回転バレル研磨におけるメディア装入率と研磨量に関する研究⁴⁾においては、容器内のマス内部における仕上区域を求めるために半径方向に一定の間隔で工作物を固定し、それぞれの位置における工作物の研磨量をメディア装入率を変えて求め、その結果メディア装入率約50vol%における容器中心部の工作物の研磨量が最大になったことより、遠心バレル研磨の場合においても同様の結果を示すものと推測している。しかし、これはあくまでも容器内に固定した工作物とメディアの相対運動によってもたらされた結果であり、実際のバレル研磨のように工作物がメディアとともに流動したときのものではない。すなわち、工作物を容器内に固定した場合には、装入率約50vol%の容器中心部における工作物とメディアの相対速度が最大になることは明らかであり、研磨量も最大となっているが、工作物がメディアとともに流動する遠心バレル研磨の場合には、図3に示すようにメディア装入率の小さい方が研磨量が大きく、流動中におけるメディアと工作物の相対速度も大きくなるもの

Fig.4 Relationship between charging ratio and stock removal rate

Fig.5 Relationship between finishing time and surface roughness

Fig.6 Relationship between media charging ratio and surface roughness (Mirror)

Fig.7 Relationship between media charging ratio and surface roughness (Ground)

と思われる。

図4は、タレット回転数ならびにメディア装入率を変えたときの研削加工面における研磨量を単位時間当たりの研磨量（研磨率）で示したものであり、鏡面の加工面についてもほぼ同様の傾向を呈している。同図より、メディア装入率が小さく、タレット回転数が大きい条件では研磨率が增大することがわかる。とくに、タレット回転数が増大するほど、メディア装入率による研磨率の変化の割合が大きくなっている。また、いずれのタレット回転数においても、メディア装入率20vol%から30vol%の間で研磨率が著しく変化していることが明らかである。

3.2 仕上面粗さへの影響

図5は、タレット回転数200rpm、メディア装入率50vol%において研削加工および研磨紙で鏡面に仕上げた工作物をそれぞれバレル研磨したときの仕上面粗さの時間的推移を示したものである。研削加工面の工作物では、仕上面粗さは研磨開始後、急速に減少し、その後はゆるやかに減少している。一方、鏡面の工作物の場合には研磨時間2時間後において仕上面粗さはほぼ一定値を示しており、研削加工面もこの値以下には仕上げられないことより、この付近の値が本研磨条件で到達し得る仕上面粗さの限界値を示しているものと考えられる。

図6は、タレット回転数を変化させ、鏡面の工作物を4時間研磨後の仕上面粗さをメディア装入率の影響について示した結果である。

同図より、メディア装入率が小さく、タレット回転数の大きい方が仕上面粗さは増大しており、図4に示した研磨率の結果と定性的に同様の傾向を示していることがわかる。また、この結果は、本研磨条件で到達し得る仕上面粗さの限界値を示しており、これより良好な仕上面粗さを得るには、メディア装入率

を大きく、タレット回転数を低くしなければならないことが明らかである。

一方、図7は研削加工面の工作物を図6の場合と同様の研磨条件で研磨したときの仕上面粗さを示したものである。

同図は、図6の結果とは逆にタレット回転数が大きくなる方が仕上面粗さが小さくなっている。これは、研削加工面の粗さが大きく、それを除去するための研磨時間が十分でないことから、仕上面粗さが限界値にまで到達していないことによるものである。

しかし、仕上面粗さが限界値にまで到達していないとはいえ、タレット回転数200と240rpmの場合にはメディア装入率に対して図6に示した結果と定性的に同様の傾向を示しており、タレット回転数120, 160rpmにおいても研磨の進行に伴って同様の傾向を示すものと思われる。このことから、研削面の工作物の到達し得る仕上面粗さを最短時間で良好にするには、図7においても明らかに、まずタレット回転数およびメディア装入率を増加させた研磨条件で研磨を行い、その仕上面粗さが到達し得る仕上面粗さの限界値に近づいたとき、次に図6に示したようにタレット回転数を減少させればできることになる。

3.3 エッジ丸味半径への影響

図8は、タレット回転数を変化させた場合のメディア装入率と4時間研磨後の工作物エッジ部の丸味半径の関係を示したものである。

同図より、メディア装入率が小さく、タレット回転数の大きい方が、エッジ丸味半径は増大していることがわかる。また、いずれのタレット回転数においてもメディア装入率20vol%から30vol%の間でエッジ丸味半径が著しく減少しており、研磨率の傾向と全く同様であることがわかる。このことは、研磨率

Fig.8 Relationship between media charging ratio and edge radius

Fig.9 Shade change of pressure sensitive film

Fig.10 Relationship between media charging ratio and contact pressure

の大きい条件において、エッジ部もよく研磨されれば当然の結果である。

3.4 メディアと工作物の接触圧への影響

図9は、工作物表面に感圧フィルムを貼り付け、装入率を変化させてバレル回転数240rpmにおいて1分間装入した後の感圧フィルムの色濃度変化を示したものである。

感圧フィルムは、メディアと工作物の接触圧が高くなるにつれて発色濃度が濃くなるようになっており、図より装入率20vol%において発色濃度が最も濃く、発色の分布も密であることからメディアと工作物は高い圧力状態で接触していることが明らかである。

図10は、感圧フィルムの発色濃度を濃度計により測定し、圧力に換算した結果を示したもので、メディア装入率が増大するにつれてメディアと工作物の接触圧が減少することがわかる。とくに、装入率20vol%から30vol%の間において著しい接触圧の減少が認められる。

3.5 タレット回転数が接触圧に及ぼす影響

図11は、装入率20vol%および50vol%においてタレット回転数とメディアおよび工作物の接触圧との関係を示したもので、いずれのタレット回転数においても装入率20vol%の接触圧が大きいことがわかる。また、接触圧はタレット回転数の増大に伴って増大しており、これはタレット回転数の増加によるバ

Fig.11 Relationship between turret speed and contact pressure

Fig.12 Relationship between media charging ratio and relative stock removal rate

Fig.13 Geometric relationship between media charging ratio and mass flow

ル容器内のメディアと工作物の流動速度ならびにそれらに作用する遠心力の増大に起因するものと考えられる。

3.6 マスの流動性に及ぼす影響

研磨率、エッジ丸味半径およびメディアと工作物の接触圧は、いずれもメディア装入率に対して定性的に同様の傾向を示している。これは、メディア装入率の低下にともないメディアと工作物の接触圧が増加するため、研磨量が増大するとともに、エッジ丸味半径も増大するものと考えられる。

図12は、図4のそれぞれのタレット回転数においてメディア装入率50vol%の研磨率を1としたときの研磨率を相対研磨率とし、メディア装入率と相対研磨率の関係を示したものである。

同図より、相対研磨率はタレット回転数の影響をほとんど受けていないことがわかる。すなわち、メディア装入率によるマスと容器の幾何学的関係により、マスの流動状態がその影響を受け、相対研磨率が変化するものと考えられる。

図13は、円筒容器の中のマスの状態を単純化して示したものである。マスは図1に示したように容器との摩擦と遠心力により容器の回転方向に流動しており、その周速度は容器の周速度に比例するものと考えられる。

Fig.14 Relationship between media charging ratio and relative gradient of mass flow speed

Fig.15 Relationship between media charging ratio and relative rotation of mass

従来の容器に工作物を固定した実験においては、メディア装入率50vol%で容器中心において工作物とマスの相対速度が最大となり、しかもマスの表面長さ（流動層）も最大となるので、研磨能力が最も高くなるものと考えられていたが、実際の遠心バレル研磨においてはメディアと工作物はともに流動しており、その相対速度はマス内の速度勾配の影響を直接受けると考えられる。すなわち、図13に示すように速度勾配はマスの表面から容器の最下位置までの距離 Y に反比例するので、メディア装入率が小さいほど速度勾配は大きくなり、研磨量が増大するものと考えられる。

図14は、メディア装入率50vol%における速度勾配を1としたときの相対速度勾配を図13の幾何学的関係より求めたもので、既に示した実験結果と同様な傾向を示していることが明らかである。

また、マスの周長はメディア装入率が小さいほど小さくなるので、容器とマス間にすべりがないとすると、容器1回転に対するマスの回転数（自転）はメディア装入率が小さくなるにつれて増大する。すなわち、メディア装入率が小さい方がマスの回転数が大きく、マスの周速度が増大するわけではないが、回転数の大きい方がマスも激しく流動し、メディアと工作物の相対速度は大きくなり、その結果として研磨量が増すものと考えられる。

図15は、メディア装入率が100vol%における回転数を1としたときのマスの相対回転数を図13の幾何学的関係より求めたもので、この場合も実際の加工結果と定性的に同様な傾向を示している。

以上のように、メディア装入率はマス内の速度勾配および回転数に影響し、メディアと工作物の接触圧力や相対速度を変えることにより、研磨量を変化させるものと考えられる。

3.7 メディア装入率と加工能率

メディア装入率は、本研究において装入したメディアの体積

Fig.16 Relationship between media charging ratio and relative amount of total stock removal

を示すだけでなく、容器内で研磨に利用される体積（マスの体積）を示している。また、実際のバレル研磨においてはメディアと工作物の体積比（混合比）が一定となるように複数個の工作物を同時に装入し、研磨を行うのが通常である。そのため、容器内で研磨に利用される体積が大きくなるほど、同一の混合比でも多数の工作物を研磨できることになり、全体としての研磨量は多くなる。すなわち、全研磨量は、メディア装入率と相対研磨率に比例することになる。

図16は、メディア装入率50vol%における全研磨量を1としたときの全研磨量を相対全研磨量とし、図12に示した相対研磨率の近似曲線を用いて、各メディア装入率における相対全研磨量を求めたものである。この図から、「3.1 研磨量への影響」の項で明らかにした個々の工作物の研磨量だけでなく、全研磨量においてもメディア装入率50vol%で最高値をとらないことが明らかになった。

4. 結 言

砥粒混入アラミド樹脂メディアを使用し、機械構造用炭素鋼のドライバレル研磨を行い、遠心バレル研磨におけるメディア装入率の影響について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 研磨率は、メディア装入率の増加に伴って減少し、その減少割合はメディア装入率20vol%から30vol%の間で著しく大きくなっている。
- (2) メディア装入率に対する到達し得る仕上面粗さとエッジ部の丸味半径の変化は研磨率と同様の傾向を呈する。
- (3) メディア装入率50vol%における研磨率に対するそれぞれの研磨率の比を相対研磨率とすると、同等のメディア装入率に対する相対研磨率はタレット回転数にかかわらずほぼ同等である。
- (4) 研磨率は、マスの流動状態によって大きな影響を受ける。また、マスの流動状態は、メディア装入率の変化に伴うマスと容器の幾何学的関係によるマス内の速度勾配および回転数により影響を受ける。

参 考 文 献

- 1) 山本章裕, 北嶋弘一, 野呂田 進: 砥粒混入アラミド樹脂メディアによるドライバレル研磨の研究, 砥粒加工学会誌, 40, 2 (1996) 96.
- 2) 松永正久: 遠心バレル研磨法, 生産研究, 18, 3 (1966) 71.
- 3) M.Punamia and P.T.Blotter: Workpiece Kinetics in Centrifugal Barrel Finishing, SME Tech. Paper, MR81-406, (1981)1.
- 4) 精機学会編: 新訂精密工作便覧, コロナ社, (1981) 838.