多気孔メラミンボンドホイールの開発と金型材料の精密研削* (遊離砥粒を併用した自生作用の制御)

仙波 卓 弥^{*1}, 大 森 舜 二^{*1}
佐久間 敬 三^{*2}, 竹 内 恵 三^{*3}

Development of Porous Melamine-Bonded Wheel for Smooth and Mirrorlike Finish of Die Materials (In-Process Dressing Using Grinding Fluid with Abrasive Grains)

Takuya SENBA, Shunji OMORI,
Keizo SAKUMA and Keizo TAKEUCHI

Melamine-bonded wheels with diamond fine grains and pore structures were developed for smooth and mirrorlike finish of die materials. White fused alumina (WA) grains were added into a grinding fluid to enable self-dressing of the wheel by rolling WA grains between the wheel and a work material. The effect of WA grains on the self-dressing was examined through the measurement of grinding force, removal rate and wheel wear rate; that could be obtained under the process of surface grinding of a sintered tungsten carbide. It was clarified that the removal rate and the wheel wear rate could be controlled by varying the WA grain size and grain density in the fluid. Namely, the wheel wear was generated actively in proportion as the WA grain density in the grinding fluid became high. Also, it was confirmed that the wheels wear rate overcame the removal rate in the case that the WA grain size in the fluid became larger than 30% value of diamond grains that were contained in the wheel.

Key Words: Grinding Wheel, Die, Wheel Wear, Self Dressing, Abrasive Gain

1. 緒 言

金型の仕上げ加工は固定砥粒を用いた平滑加工と、遊離砥粒を用いた鏡面仕上げ加工とに分けられている。これらの加工は作業者による数多くの試行錯誤と長年の経験によって構築された工程であり、平滑加工ならびに鏡面仕上げ加工とも複数の工程に細分化されているのが現状である⁽¹⁾。しかし金型の加工時間を短縮化するためには、既存の工具技術の性能に合せて仕上げ加工工程を細分化するのではなく、工程の数を減らすことができるような工具技術を新たに開発する必要があるのではないかと考えられる。

このような背景から、前報⁽²⁾では金型の平滑加工と鏡面仕上げ加工とを単一の工具で行うことを指向した工具技術の開発を行った。弾性係数が高い結合剤を用いた上で砥石を発泡構造にすることによって、砥石に適度な柔軟性をもたせると同時に平滑な加工面を高能

率に得ることを試みた。しかし自生作用が常に生じるようなホイールを試作することができなかった。

この自生作用を活性化させる手段としてはホイール自身の性能を改善することのほかに、インプロセスでのドレッシングを行うといった方法が考えられた。本論文では発泡構造をもつレジンボンドホイールを試作すると同時に、ワークよりも硬さの柔らかい遊離砥粒を研削液の中に入れ、ホイールの自生作用を活性化させることを試みた。

2. 実験装置および実験方法

2・1 多気孔メラミンボンドホイール 砥粒には平均粒径が4 μmのダイヤモンド、砥粒の支持剛性を上げるために結合剤にはメラミン樹脂⁽³⁾を使用した。弾性係数が高い結合剤を用いた上でホイールに適度な弾性をもたせるために、発泡構造をもつホイールを試作することにした。炭酸水素ナトリウムと酸性ピロリン酸ソーダを発泡剤、ポリビニルアルコールを可塑剤として使用した。

十分に混合したこれらの粉末を金型に入れ、150°Cで30分間の加熱を行うことによって外径が30 mm、

* 原稿受付 1995年3月22日。

^{*1} 正員、福岡工業大学 (〒811-02 福岡市東区和白東3-30-1)。

^{*2} 正員、九州大学 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

^{*3} ノリタケダイヤ(株) (〒839-12 福岡県浮羽郡田主丸町大字竹野210)。

幅が4 mm、高さが15 mmの6号ストレートカップ形のホイールを成形した。発泡剤の配合量を10 Vol%、可塑剤の配合量を5 Vol%に保った上で、気孔率と集中度を変化させたホイールを試作した。

2・2 研削液 ホイールの自生作用を活性化させるために、蒸留水にアルミナ砥粒を混入した溶液を研削液として用いることにした。アルミナ砥粒が研削液に沈殿するのを防ぐためと、研削液をワークとホイールとの接触面に滞留させる両方の目的で、分散作用や増粘作用をもつカルボキシメチルセルロース(CMC)⁽⁴⁾を研削液に添加した。

2・3 実験装置および方法 実験に使用した装置の概要を図1に示す。立形マシニングセンタの主軸にジグを介して試作したホイールを取付け、30×15 mmに予備成形された超硬合金(H_RA 90.5)に対する平面研削を行った。研削条件は表1のとおりである。3 μmの砥石切込みにに対して100パスのスパークアウト研削を行った後、再度3 μmの砥石切込みを与えるといった方式での平面研削を、設定砥石切込量が30 μmに達するまで行った。

試作した研削液は0.5 ml/100パスの割合でホイールとワークとの接触面にメスピペットで滴下することにした。またワークの除去量やホイールの損耗量を測

定するために、両者の端面にはあらかじめ50 μm程度の段差を成形した。なお試作したホイールのツルイーニングとドレッシングには駆動式の横形ロータリドレッサに装着したGC砥石(GC 6000 O 12 V)、ワークの予備成形にはレジンボンドホイール(SD 600 S 50 B)を使用した。またホイールやワークに成形した段差の測定には電気マイクロメータ、研削抵抗の測定には切削工具動力計を使用した。

3. ワークの除去率とホイールの損耗率

変位切込み方式での研削加工を行う場合、ホイールとワークとの接触状態は図2(b)のように表される。 Δ は設定砥石切込み量、 Δ' は実砥石切込み量、 δ_R はワークの切り残し量、 δ_W は砥石の損耗量、ならびに δ_e は工作機械や砥石の弾性変形量を表している。この実砥石切込み量やワークの切り残し量は試作したホイールの研削性能が異なることによって変化するのではないかと考えられた。

そこで式(1)のようにワークの除去率 ε やホイールの損耗率 ω を定義し、試作したホイールの研削性能を評価することを試みた。

$$\varepsilon = \Delta' / \Delta, \quad \omega = \delta_W / \Delta \quad \dots\dots\dots (1)$$

また累積研削抵抗 P_n を式(2)のように定義し、ワークの除去率やホイールの損耗率と法線研削抵抗との関

Table 1 Grinding conditions

Truing Dressing	Truer: GC6000012V(125D×20T×16H) Rev. speed of truer: 500 rev/min Rev. speed of grinding wheel: 200 rev/min Table speed: 1m/min Setting depth of cut: 1 μm Coolant: Soluble(1/50)
Grinding	Rev. speed of grinding wheel: 100 rev/min Table speed: 2m/min Setting depth of cut: 3 μm Coolant: Soluble(1/50), CMC fluid containing WA grain Workpiece: Sintered tungsten carbide (30×15mm, H _R A=90.5)

(a) Before grinding (b) While grinding

Fig. 2 Geometrical relationship

Fig. 1 Schematic view of experimental setup

Fig. 3 Normal grinding force and pass number

係を明らかにすることを試みた。

$$P_n = \int_0^{t_{\max}} F_n(t) dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

$F_n(t)$ は法線研削抵抗, $t_{\max}$ は加工時間を表している。

なお工作機械やホイールの弾性変形率 γ を

$$\gamma = \delta_e / \Delta \quad \dots\dots\dots (3)$$

と定義すれば, ワークの除去率 ε , ホイールの損耗率 ω と弾性変形率 γ との間には,

$$\varepsilon = (1 - \gamma) - \omega \quad \dots\dots\dots (4)$$

といった幾何学的な関係が成り立っている。

4. 実験結果

4.1 研削液の種類・供給方法とホイールの性能

集中度 C が 150, 気孔率 α_a が 60 Vol% のホイールを用いた場合に得られた研削抵抗とパス回数との関係を図 3 に示す。使用した研削液の種類や研削液の供給方法は表 2 のとおりである。市販の透明型水溶性研削液⁽⁵⁾ や蒸留水を水槽にいれ, 液中で研削を行った場合に得られた結果を○ならびに△印で示した。また蒸留水や蒸留水に CMC を 6 wt%, 平均粒径が 2 μm のアルミナ砥粒を 30 wt% 混入した研削液をワークとホイールとの接触面に滴下した場合の結果をそれぞれ▲, □印で示した。同じホイールを用いた実験の結果であるにもかかわらず, 研削液の種類や供給方法が異なると法線研削抵抗は大きく異なっていることがわかる。

この場合に得られた累積研削抵抗 P_n , ワークの除去率 ε ならびにホイールの損耗率 ω は図 4 のように

Table 2 Type and supply of grinding fluid

Type	Grinding fluid	Water supply
1	Water base fluid (Soluble type, Noritake K82C)	Water bath
2	Distilled water	Water bath
3	Distilled water	Water drop
4	CMC fluid(6 wt%)	Water drop
5	CMC fluid(6 wt%) containing WA grain(#6000, 30 wt%)	Water drop

Fig. 4 Grinding fluid and grinding performance of the wheel

整理される。タイプ 2 と 3 の結果から明らかなように, 研削液の供給方法を変えたとしてもホイールの研削性能はほとんど変化していない。ただし使用する研削液の種類が異なるとワークの除去率やホイールの損耗率は大きく変化していることがわかる。特にタイプ 4 と 5 の差は大きく, 研削液に混入したアルミナ砥粒がホイールとワークとの間で転動し, ホイールの損耗に大きく寄与したようすがうかがえる。図 4 のように得られた実験の結果を受けて, 以下の実験では研削液をホイールとワークとの接触面に滴下することにした。

4.2 アルミナ砥粒の濃度と自生作用

研削液に混入するアルミナ砥粒の濃度を变化させた場合に得られたワークの除去率 ε と砥粒濃度 ρ との関係を図 5, ホイールの損耗率 ω と砥粒濃度 ρ との関係を図 6 に示す。研削液に混入したアルミナ砥粒の粒径は 2 μm , 使用したホイールの集中度 C は 150, 気孔率 α_a は 60 Vol% である。ワークの除去率ならびにホイールの損耗率とも, アルミナ砥粒の濃度が異なると大きく変化していることがわかる。ホイールの損耗率が増すに従ってワークの除去率が減少しているのが特徴である。

縦軸にワークの除去率 ε , 横軸にホイールの損耗量 ω をとり, 図 5 や 6 のように得られた実験の結果を整理すると図 7 の結果を得る。比較のため, 図 4 のよう

Fig. 5 Removal rate and Al_2O_3 grain density in CMC fluid

Fig. 6 Wheel wear rate and Al_2O_3 grain density in CMC fluid

に得られていた実験の結果を図7に△, ▲ならびに□印で付記した。図中に破線で示した直線は、式(4)において工作機械やホイールの弾性変形率 γ を零とした場合に得られるワークの除去率とホイールの損耗率との関係を表している。実験点が破線から離れるに従って工作機械やホイールの弾性変形率が増加したことを表している。

図7の結果によれば、研削液にアルミナ砥粒を混入した場合に得られたワークの除去率とホイールの損耗率との間には負の相関が成り立っていることがわかる。これは砥粒濃度が増すに従ってホイールとワークとの間で転動し、ホイールを除去することに関与したアルミナ砥粒の数が増加したことを表している。

4.3 研削液の粘度と自生作用 研削液に混入するアルミナ砥粒の粒径を $2\mu\text{m}$ 、砥粒の濃度を10 wt%に保った上で、研削液に添加するCMCの濃度を变化させた場合に得られたワークの除去率 ϵ 、ホイールの損耗率 ω とCMC濃度 η との関係を図8に示す。使用したホイールの集中度 C は150、気孔率 α_a は60 Vol%である。参考のために研削液の粘度を同図に□印で付記した。

ホイールの損耗率はCMC濃度が0~2 wt%の間で増加し、2~8 wt%の範囲ではほとんど変化していな

いことがわかる。CMCを研削液に添加しなかった場合には、ホイールに付着した研削液が遠心力によって飛散するといった現象が観察された。したがってCMCを研削液に添加した場合には、ワークとホイールとの間に滞留し、ホイールの損耗に寄与したアルミナ砥粒の数が増加したのではないかと判断される。なおCMCの濃度を4 wt%以下にした場合には砥粒が沈殿し、砥粒を研削液の中に均一に分散させることができなかった。そこで研削液に添加するCMCの濃度を6 wt%とした場合について以下の実験を行うことにした。

4.4 ホイールの集中度と自生作用 ホイールの気孔率 α_a を60 Vol%に保った上で、集中度 C を变化させた場合に得られたワークの除去率 ϵ と研削液に混入したアルミナ砥粒の濃度 ρ との関係を図9、ホイールの損耗率 ω と砥粒濃度 ρ との関係を図10に示す。研削液に混入したアルミナ砥粒の粒径を $2\mu\text{m}$ 、CMCの濃度を6 wt%とした場合の結果である。集中度を零とした場合の結果に着目すると、ホイールのみが損耗し、ワークはまったく削れていないことがわかる。したがって研削液に混入したアルミナ砥粒はワークから切りくずを除去することには全く関与せず、ホイールの損耗のみに寄与していたことがわかる。

Fig. 7 Removal rate and wheel wear rate

Fig. 9 Removal rate and Al_2O_3 grain density in CMC fluid

Fig. 8 Removal rate, wheel wear rate and Al_2O_3 grain density in CMC fluid

Fig. 10 Wheel wear rate and Al_2O_3 grain density in CMC fluid

Fig. 11 Removal rate, wheel wear rate and concentration of wheels

Fig. 14 Removal rate, wheel wear rate and porosity of wheels

Fig. 12 Removal rate and Al₂O₃ grain density in CMC fluid Fig. 13 Wheel wear rate and Al₂O₃ grain density in CMC fluid

研削液にアルミナ砥粒を 10 wt% 混入した場合の結果に着目すると、ワークの除去率 ε やホイールの損耗率 ω と集中度 C との関係は図 11 のように表される。ワークの除去率は集中度が 100 付近で最大になるような凸形の変化をしているのに対し、ホイールの損耗率は凹形の変化をしていることがわかる。集中度が増すに従って結合剤の量が減少するためにホイールの結合度は低下することになる。したがって集中度が 100 の場合に比べて集中度が 150 の場合にホイールの損耗率が増加したのは、ホイールの結合度が低下したためではないかと考えられる。

4・5 ホイールの気孔率と自生作用 ホイールの

Fig. 15 SEM topograph of wheel surfaces

集中度 C を 150 にした上で、気孔率 α_a を変化させた場合に得られたワークの除去率 ε と研削液に混入したアルミナ砥粒の濃度 ρ との関係を図 12、ホイールの損耗率 ω と砥粒濃度 ρ との関係を図 13 に示す。研削液に混入したアルミナ砥粒の粒径を 2 μm 、CMC の濃度を 6 wt% とした場合の結果である。

ホイールの集中度を変化させた場合に図 9 のように得られていた実験の結果に比べると、気孔率を変化させたとしてもワークの除去率はほとんど変化していないことがわかる。特に研削液に混入したアルミナ砥粒の濃度が 50 wt% 以上の場合にはワークの除去率はほとんど変化していない。アルミナ砥粒の濃度を高くした場合には、実験が終了した後でワークを洗浄する際にペースト状の皮膜がワークの表面に付着しているようすが観察された。したがってアルミナ砥粒の濃度が高い場合には、アルミナ砥粒やホイールから脱落した砥粒がホイールの損耗のみに関与したのではないかと考えられる。

ただし図 12 や 13 の結果によれば、アルミナ砥粒の濃度が低い場合にはワークの除去率やホイールの損耗率とも有為に変化しているのではないかと判断された。そこで研削液にアルミナ砥粒を 10 wt% 混入した場合に得られた実験の結果に着目すると、ワークの除

去率 ε やホイールの損耗率 ω と気孔率 α_a との関係は図14のように表される。気孔率が増すに従ってホイールの損耗率が減少しているのは、遊離砥粒が気孔に入る度合いが増加し、ホイールとワークとの接触面で転動する砥粒の数が減少したためではないかと考えられる。

なお気孔率が零の場合にはホイールの損耗率が低くなっている。これはホイールを加熱成形する際に粉末の間に残留する空気を除去する目的でホイールを圧縮したために、ホイールの結合度が高くなったためではないかと考えられる。気孔率を変化させた場合に観察されたホイール表面の様子は図15に示すとおりであり、気孔率が減少するに従ってホイールの結合度が高くなっているようすがうかがえる。

5. 考 察

5.1 試作したホイールの研削性能 ホイールの集中度 C や気孔率 α_a を変化させた場合に図9や12のように得られたワークの除去率 ε と、式(2)のように定義した累積研削抵抗 P_n との関係を図16の結果を得る。また図10や13のように得られたホイールの損耗率 ω と累積研削抵抗 P_n との関係は図17のように整理される。比較のために、透明型水溶性研

削液⁽⁵⁾ を用いて液中研削を行った場合に得られた実験の結果を□印で付記した。

図16の結果によれば、○、△印の場合には累積研削抵抗が増すに従ってワークの除去率は増加していることがわかる。また図17の結果から明らかなように、ホイールの損耗率は累積研削抵抗が増すに従って減少している。これらの結果はホイールの損耗率が増すに従って法線研削抵抗が減少したために、ワークの除去率が減少したことを表している。またインプロセスでのドレッシングが適切に行われていたために、ワークの除去率は累積研削抵抗に比例して増加したのではないかと考えられる。

なお図7と同様の整理を行うと、図16や17の結果は図18のように集約される。主として研削液の中に混入したアルミナ砥粒の濃度を変化させたことによってホイールの研削性能は広い範囲で変化していることがわかる。ただし破線で示した直線からの隔たりはほとんど変化していない。したがって集中度や気孔率を変化させた各場合とも、ホイールが弾性変形する度合は変化しなかったのではないかと判断される。

5.2 アルミナ砥粒の粒径と自生作用 研削液に混入するアルミナ砥粒の濃度を10 wt%、CMCの濃度を6 wt%に保った上で、砥粒の粒径を変化させた場

Fig. 16 Removal rate and accumulated normal grinding force

Fig. 18 Removal rate and wheel wear rate

Fig. 17 Wheel wear rate and accumulated normal grinding force

Fig. 19 Removal rate, wheel wear rate, surface roughness and Al_2O_3 grain size in CMC fluid

Fig. 20 Removal rate and accumulated normal grinding force

合に得られたワークの除去率 ε 、ホイールの損耗率 ω と砥粒径との関係を図 19 に示す。使用したホイールの集中度 C は 150、気孔率 α_a は 60 Vol% である。

ワークの除去率は平均粒径が $1.2 \mu\text{m}$ のアルミナ砥粒を用いた場合に最も高く、砥粒の粒径が増すに従って減少していることがわかる。ホイールの成形に使用したダイヤモンド砥粒の平均粒径が $4 \mu\text{m}$ であったことを踏まえると、アルミナ砥粒の粒径が $1.2 \mu\text{m}$ の場合にはワークとホイールとの間に侵入したアルミナ砥粒が主としてホイールの結合剤を除去し、適切な状態でドレッシングが行われていたのではないかと考えられる。

この場合に得られたワークの除去率 ε の累積研削抵抗 P_n との関係は図 20 のように表される。アルミナ砥粒の粒径を図中に付記した。 $1.2 \mu\text{m}$ 以下の範囲でアルミナ砥粒の粒径を増加させた場合には、累積研削抵抗が減少すると同時にワークの除去率が増加していることがわかる。したがってアルミナ砥粒の粒径が $1.2 \mu\text{m}$ 以下の範囲では粒径が増すに従ってドレッシングが活性化されたのではないかと考えられる。

一方アルミナ砥粒の粒径を $2 \mu\text{m}$ 以上の範囲で増加させた場合には、累積研削抵抗が減少するに従ってワークの除去率が減少している。これはアルミナ砥粒の粒径が増すに従ってホイールの損耗が増加し、ドレッシングが不十分であったことと法線研削抵抗が減少したことの両方の原因によって、ホイールの研削性能が低下したことを表している。

5.3 アルミナ砥粒の粒径と加工面の粗さ

研削液に混入するアルミナ砥粒の粒径を、 $0.4 \sim 8 \mu\text{m}$ の範囲で変化させた場合に測定された加工面の粗さを図 19 に□印で示す。アルミナ砥粒の粒径が減少するに従

って加工面の粗さは向上し、粒径が $1.2 \mu\text{m}$ 以下の場合には $40 \text{ nm } R_z$ 程度の加工面が得られている。これはアルミナ砥粒の粒径が減少するに従って、ボンド面からのダイヤモンド砥粒の突き出し高さが減少したことを表している。

6. 結 言

粒径が小さな砥粒を用いた上で高能率な研削加工を行うためにはホイールの目詰まりを防止する必要がある。この目詰まりを防止する一つ的手段として遊離砥粒を混入した研削液を用いることによってホイールの目詰まりをインプロセスで除去することを試みた。得られた結論は以下のようにまとめられる。

(1) 研削液の中に混入したアルミナ砥粒の濃度を変えることによってワークの除去率やホイールの損耗率を広い範囲で変えることができる。この場合、ワークの除去率とホイールの損耗率との間には負の相関が成り立っていることが明らかになった。

(2) アルミナ砥粒の濃度が高すぎる場合には、アルミナやホイールから脱落したダイヤモンド砥粒がワークの表面にペースト状の皮膜を生成する。この皮膜の中に含まれる遊離砥粒はホイールを損耗させることのみに関与する。

(3) ホイールの集中度が増すに従ってワークの除去率は増加すると同時にホイールの損耗率は減少する。ただし集中度を上げすぎるとホイールの結合度が低下するために、ワークの除去率が減少すると同時にホイールの損耗率は増加する。

(4) ホイールの無孔率が増すに従って気孔に侵入する遊離砥粒の数が増加し、ホイールとワークとの間で転動する砥粒の数が減少するためにホイールの損耗率は減少する。また気孔率が増すに従って作用砥粒数が減少するためにワークの除去率は減少する。

文 献

- (1) 幸田盛堂, 金型磨き加工とその自動化, 砥粒加工学会誌, 34-2(1990), 9-14.
- (2) 仙波卓弥・大森舜二・竹内恵三・大平研五, 多気孔メラミンボンドホイールの開発と金型材料の精密研削, 機論, 61-585, C(1995), 352-358.
- (3) 村橋俊介・小田良平, 井本稔, プラスチックハンドブック, (1980), 884-889, 朝倉書店.
- (4) 中村亦夫監修, 水溶性高分子, 別冊化学工業, 34-4(1990), 43-58, 化学工業社.
- (5) 白井英治, 切削・研削加工学(下)研削加工, (1983), 75, 共立出版.