研削砥石のドレッシングに関する研究 (第2報)*

——多石回転形ドレッシング——

中 島 利 勝** 宇 野 義 幸** 梁 瀬 佳 之***

Study on Dressing of Grinding Wheel (2nd Report)
—Dressing Technique with Diamond Cup Wheel—

Toshikatsu NAKAJIMA, Yoshiyuki UNO and Yoshiyuki YANASE

A dressing technique with a diamond cup wheel as a dresser is introduced for higher performance of grinding wheel. In the technique, the rotating diamond cup wheel is fed parallel to the wheel axis. Grinding performance is experimentally investigated under various setting conditions of the dresser, dressing conditions and grinding conditions, analyzing size generation process, grinding force, surface finish, wheel wear and so on. Sharper cutting edges are generated on the acting wheel face in the technique, while the number of cutting edges is slightly fewer than that in conventional method with a single point diamond dresser. Grinding force is therefore smaller while surface finish is rougher and wheel wear is larger as compared with conventional one. Furthermore, the grinding results are hardly affected by dresser wear in the technique, while those are significantly affected in conventional one.

Key words: dressing technique, diamond cup wheel, grinding performance, sharpness of cutting edge, number of cutting edges, size generation process, grinding force, surface finish, wheel wear, dresser wear

1. 緒 言

本研究は、良好な研削性能を発揮する砥石作用面の生成を目的としており、前報¹⁾では単石回転形ドレッシングを提案し、通常の単石ドレッシングの場合と比較していくつかの新しい知見を得た。本報告は、カップ型のダイヤモンド砥石を用いた多石回転形ドレッシングを提案し、この方法によって生成される砥石作用面の研削性能を実験的に検討したものである。まず、本方法において重要な要因となるドレッサ設置条件すなわちドレッサの傾斜角、取付高さ、ドレッサ回転数が研削抵抗、表面粗さ、砥石摩耗速度²⁾などの研削結果に及ぼす影響を調べて最適条件を選定したのち、ドレッサの切込み深さ、送り速度の影響を検討した。次に工作物1回転あたりの設定砥石切込み量、工作物と砥石との速度比および相対研削速度を組織的に変化させた研削実験を行って、加工条件が研削結果に及ぼす影響を解明した。さらに、ドレッサの摩耗が研削過程に及ぼす影響についても、実験的検討を行った。

2. 多石回転形ドレッシング法

本報告で用いた多石回転形ドレッシング法の概要を図1に示す。すなわち、ドレッシング用工具としては、直径25mmの金属円筒の端面に#10~12程度のダイヤモンド砥粒を60個(約1.3mmピッチ)埋め込んだカップ型ダイヤモンド砥石を用い、これを回転させながら砥石幅方向に送って砥石作用面生成を行うものである。これは、前報の単石回転形ドレッシング法では、条件によってはドレッサの一部分が砥石作用面と接触せずに前加工面が残ってしまう場合も存在したので、この欠点を補い、より有効にかつ能率的に砥石作用面

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

* 原稿受付 昭和59年12月6日、精機学会昭和59年度関西地方定科学術講演会(昭和59年7月24日)にて発表

** 正 会 員 岡山大学工学部(岡山市津島中3-1-1)

*** 学生会員 岡山大学大学院

Fig. 2 Setting conditions of dresser

生成を行おうとするものである。この方法を用いれば、ダイヤモンド砥粒 1 個あたりにかかる力は小さくなり、また 1 円周のうち一部分しか砥石と接触しないために、ドレッサの摩耗も少なく、さらに砥石とドレッサとは絶えず同一状態で接触しているので、安定な砥石作用面の生成ができると考えられる。この方法では、ドレッシング条件として、通常のドレッサ切込み深さと送り速度のほかに、図 2 に示すように、テーブルと平行な面内でのドレッサ横傾斜角 θ 、テーブルと垂直な面内でのドレッサ縦傾斜角 β 、ドレッサ取付高さ z およびドレッサ回転数 N_d が考えられる。本報告では、ドレッサ縦傾斜角 β は $\beta=0^\circ$ (一定)、すなわちドレッサ回転軸は絶えずテーブル面と平行とした。またドレッサ取付高さ z は図 (d) に示すように、ドレッサと砥石との接触角 ϕ と直接関連するものであるから、以後ドレッサ接触角 ϕ で示す。さらに、ドレッサ回転数 N_d はドレッサの速度を決定するものであるが、ドレッサ横傾斜角 θ の正負によってその方向が異なり、上向きドレッシングと下向きドレッシングとに区別される。

3. 実験方法

多石回転形ドレッシングの実験装置の概略は前回の図 1 に示したようである。ドレッシングは、まず前加工の影響を除去するために、切込み $5 \mu\text{m}$ 、送り 0.05 mm/rev の単石ドレッシングを数回施して砥石表面を平滑に成形したのち、所定の横傾斜角 θ 、ドレッサ接触角 ϕ 、ドレッサ回転数 N_d 、切込み深さ Δ_d 、送り S_d を設定して 1 回だけ行う。ドレッシング後、研削性能の検討をするために、円筒ブランジ方式で研削実験を行い、寸法生成過程、研削抵抗、表面粗さ、砥石摩耗速度などを測定する。研削実験にあたって、砥石台移動量、工作物半径減少量は電気マイクロメータで、また

研削抵抗は工作物支持センタに貼付したひずみゲージで検出する。さらに、砥石摩耗はアクリル板に転写した砥石作用面形状を触針式表面検査機で測定することによって求める。主なドレッシング条件および研削条件は以下のようである。

(I) ドレッシング条件

ドレッサ：カップ型ダイヤモンド砥石 (直径 25 mm)

および 120° 円すいドレッサ (先端摩耗幅 0.5 mm)

横傾斜角： $\theta = -45 \sim 45^\circ$

縦傾斜角： $\beta = 0^\circ$ (一定)

接触角： $\phi = -90 \sim 90^\circ$

ドレッサ回転数： $N_d = 1\,000 \sim 3\,500 \text{ rpm}$

砥石回転数： $N_s = 1\,592 \text{ rpm}$

ドレッサ切込み深さ： $\Delta_d = 5 \sim 30 \mu\text{m}$

ドレッサ送り： $S_d = 0.05 \sim 0.3 \text{ mm/rev}$

(II) 研削条件

研削方式：円筒ブランジ方式

研削砥石：WA 80 L 7 V ($\phi 405 \times 50 \text{ mm}$)

工作物：S 45 C ($\phi 105 \times 30 \text{ mm}$)

相対研削速度： $V = V_s + V_w = 673 \sim 2\,046 \text{ m/min}$

(ただし V_s ：砥石周速度, V_w ：工作物速度)

速度比： $K_v = V_w / V_s = 0.007 \sim 0.023$

設定砥石切込み量： $\Delta = 0.5 \sim 5 \mu\text{m/rev of W.P.}$

研削系剛性： $k_{sy} = 10.4 \text{ MN/m}$

研削液：ソリュブル形

4. 砥石作用面性状と研削過程

ドレッシングによって生成された砥石作用面の性状は、研削過程と密接な関係を有する。図 3 は、多石回転形ドレッシングおよび通常の単石ドレッシングを施した砥石を用いて、同一研削条件で円筒ブランジ研削を行った場合の寸法生成曲線および研削背分力の変化過程を示すものである。図中、実線は多石回転形ドレッシングの場合を、破線は単石ドレッシングの場合を示している。また $d(t)$ は砥石台移動量、 $R(t)$ は工作物半径減少量、 $p(t)$ は研削背分力、 t_s は定常研削状態に達するまでの過渡研削時間、 t_f は寸法生成が行われなくなるまでの有効スパークアウト研削時間を表す。図より明らかなように、多石回転形は単石の場合に比べて定常研削背分力が約 $1/2$ と小さく、また切残し量も小さくなっている。さらに、過渡研削時間、有効スパークアウト研削時間も多石回転形の方が短くなっている。これらのことは能率および精度の点から、多石回転形ドレッシングを施した方が単石の場合よりも有利であることを示している。図 4 は、上記の砥石作用面について、前報で定義した平均切れ刃数 $\bar{n}$ と砥石表面

Fig. 3 Plunge grinding processes

Fig. 4 Mean number of cutting edges and mean sectional area of a cutting edge on each acting wheel face

からの深さ y との関係および切れ刃 1 個あたりの平均断面積 $\bar{a}$ と y との関係を測定した結果を示すものである。図中、 $\bar{n}_{10}$ は砥石表面からの深さ $y = 10 \mu\text{m}$ における平均切れ刃数、 $\bar{a}_0$ は仮想初期摩耗面積、 θ は切れ刃鋭利係数をそれぞれ表す¹⁾。また白丸は多石回転形を、黒丸は単石の場合を示す。図より明らかなように、いずれの場合も砥石表面からの深さ y が増加するにつれて平均切れ刃数 $\bar{n}$ は増加するが、多石回転形は単石の場合に比較してやや少なくなっている。しかし、

Fig. 5 Effect of swivel angle on grinding force

Fig. 6 Effects of swivel angle on surface roughness and wheel wear rate

仮想初期摩耗面積 $\bar{a}_0$ と切れ刃鋭利係数 θ は多石回転形の方が小さく、砥石作用面上に鋭利な切れ刃が出現していることを示している。

5. ドレッサ設置条件の影響

図 5 および図 6 は、ドレッサの横傾斜角 θ を変化させてドレッシングを施した砥石を用いて研削した場合の、定常研削背分力 p_s 、主分力 q_s 、表面粗さ $R_{\max}$ 、砥石摩耗速度 C_0 の変化を示す。図 6 において、 $(R_{\max})_s$ と $(R_{\max})_f$ はそれぞれ定常研削状態および有効スパークアウト完了後の表面粗さを示している。これらの図より明らかなように、研削抵抗 p_s, q_s は横傾斜角 θ が 0° すなわちドレッサ回転軸が砥石作用面と直交しているときに最も大きく、 $\theta = \pm 30^\circ$ 付近で最小値をとったのち、再び増加していく、また単石ドレッシングの場合と比較すると、いずれの角度でも研削抵抗はかな

Fig. 7 Effect of contact angle on grinding force

り小さくなっていることがわかる。表面粗さ $(R_{\max})_s$, $(R_{\max})_f$ および砥石摩耗速度 C_0 は、研削抵抗の変化とは逆に、 $\theta=0^\circ$ で最小となり、 $\theta=\pm 30^\circ$ 付近で最大値をとったのち、再び減少していく。また単石の場合と比較すると、表面粗さは多石回転形の方がかなり大きく、最も小さい条件の場合でも通常の場合の約2倍の値を示している。しかし、砥石摩耗速度 C_0 は $\theta=0^\circ$ で同程度の大きさとなっている。ここで θ が正の時は上向きドレッシング、 θ が負の時は下向きドレッシングとなってドレッサの速度方向が逆になるが、この結果からみるとその差はほとんどなくて、 $\theta=0^\circ$ を中心にしてほぼ左右対称の結果を示している。図7は、ドレッサ接触角 ϕ すなわちドレッサ取付高さ z を変化させた場合の研削抵抗 p_s, q_s の変化を示すものである。図より明らかなように、研削背分力 p_s 、研削主分力 q_s は接触角 ϕ が 0° のとき、すなわちドレッサ回転軸が砥石中心と同じ高さにあるときが最も小さく、ドレッサの速度ベクトルが砥石速度ベクトルと角度を有するほど大きくなっている。しかし接触角がプラスとマイナスではその変化形態が異なり、 ϕ がマイナス方向に角度を有するほど、すなわちドレッサ取付高さが高くなるほど研削抵抗は大きくなるが、 ϕ がプラスの方向すなわちドレッサ取付高さを低くする方向へ角度をつけた場合には、研削抵抗の増加はそれほど大きくはない。この差はドレッサが $\phi=90^\circ$ の方向へ送られることと関連があると考えられる。研削抵抗 p_s, q_s は $\phi=0^\circ$ では、多石回転形は単石の場合よりもかなり低い値をとっているが、 $\phi=-90^\circ$ 付近では単石の場合に近い値まで上昇する。また表面粗さは研削抵抗の変化とは逆に、 $\phi=0^\circ$ で最も大きく、角度を有するほど小さくなっている。さらに、ドレッサ回転数 N_d の影響について検討した結果、研削抵抗 p_s, q_s 、表面粗さ $(R_{\max})_s$, $(R_{\max})_f$ および砥石摩耗速度 C_0 はドレッサ回転数 N_d とは無関係にほぼ一定値を示すことが明ら

Fig. 8 Effect of dressing depth on grinding force

かとなった。以上の実験的解析から、以後のドレッシングにおいては、研削抵抗が小さく、表面粗さも比較的良好なドレッサ横傾斜角 $\theta=-15^\circ$ 、ドレッサ接触角 $\phi=0^\circ$ という条件を用いた。またドレッサ回転数 N_d は3500 rpm 一定とした。

6. ドレッシング条件の影響

図8は、ドレッサ送り S_d を0.1 mm/rev 一定にして、ドレッサ切込み深さ Δd を5~30 μm まで変化した場合の研削抵抗の変化を示すものである。図より明らかなように、多石回転形および単石のいずれの場合も、ドレッサ切込み深さ Δd の増加とともに研削抵抗は減少している。また、いずれの条件においても多石回転形は単石の場合の半分以下の値となっている。図9は、表面粗さ $(R_{\max})_s$, $(R_{\max})_f$ および砥石摩耗速度 C_0 とドレッサ切込み深さ Δd との関係を示すものである。図より明らかなように、表面粗さ $(R_{\max})_s$, $(R_{\max})_f$ および砥石摩耗速度 C_0 は、研削抵抗の変化とは逆に、ドレッサ切込み深さ Δd の増加とともに増加している。また単石の場合と比べると、いずれの値も多石回転形の方が大きくなっている。これらのことは、ドレッサ切込み深さ Δd が大きくなると、砥粒が大きなへき開破壊を起こして、鋭い切れ刃が出現するとともに切れ刃数が減少するためであると理解される。図10は、ドレッサ切込み深さ Δd を10 μm 一定にして、ドレッサ送り S_d を0.05~0.3 mm/rev まで変化した場合の研削抵抗の変化を示すものである。図より明らかなように、多石回転形と単石の場合とでは変態が異なり、単石の場合はドレッサ送り S_d の増加とともに研削抵抗は減少するのに対して、多石回転形の場合はゆるやかに増加する傾向を示している。これは一般にドレッサ送り S_d を増加させると研削抵抗は減少するが、多石回転形の場合は、ドレッサ

Fig. 9 Effects of dressing depth on surface roughness and wheel wear rate

Fig. 10 Effect of dressing feed on grinding force

と砥石との接触幅が小さいために、ドレッサ送り S_d が大きくなると前加工面がそのまま砥石作用面に残るためと考えられる。このために、多石回転形ドレッシングを施す場合には、ドレッサの接触幅とドレッサ送りとの関係に注意を払う必要がある。

7. 研削加工条件の影響

ここでは多石回転形ドレッシングを施した砥石作用面を用いて、研削加工条件が研削結果に及ぼす影響を解明する。そのために、砥石と工作物との幾何学的干渉形状³⁾を決定する工作物1回転あたりの設定砥石切込み量 Δ および工作物と砥石との速度比 $K_v (= V_w/V_s)$ と相対運動条件を決定する相対研削速度 $V (= V_s + V_w)$ を組織的に変化させて、研削抵抗、表面粗さ、砥石摩耗速度に及ぼす影響を検討する。図11は、相対

Fig. 11 Effects of setting depth of cut on grinding results

速度 V および速度比 K_v を一定にして、設定砥石切込み量 Δ を変化させた場合の研削抵抗 p_s, q_s 、表面粗さ $(R_{\max})_s, (R_{\max})_f$ および砥石摩耗速度 C_0 の変化を示すものである。図より明らかなように、設定砥石切込み量 Δ が増加するとともに、研削抵抗 p_s, q_s 、定常状態の表面粗さ $(R_{\max})_s$ および砥石摩耗速度 C_0 はそれぞれ増加している。これは、速度比 K_v を一定にして設定砥石切込み量 Δ を増加させると、幾何学的切りくず形状が大きくなり、1つの切れ刃にかかる力が増加することに起因すると考えられる。また、スパークアウト完了後の表面粗さ $(R_{\max})_f$ が設定砥石切込み量 Δ に関係に一定値となるのは、速度比 K_v が一定の場合には、設定砥石切込み量 Δ が異なっても研削抵抗減少曲線および寸法生成曲線が同一曲線で与えられる⁴⁾ ことによって理解される。相対速度 V 、設定砥石切込み量 Δ を一定にして速度比 K_v を変化させた場合も、図11の Δ の影響とほぼ同様の傾向を示し、 K_v の増加とともに $p_s, q_s, (R_{\max})_s, (R_{\max})_f, C_0$ はそれぞれ増加する。図12は、速度比 K_v 、設定砥石切込み量 Δ すなわち幾何学的切りくず形状を一定にして、相対速度 V を変化させた場合の研削抵抗 p_s, q_s 、表面粗さ $(R_{\max})_s, (R_{\max})_f$ および砥石摩耗速度 C_0 の変化を示すものである。図より明らかなように、相対速度 V の増加とともに研削抵抗 p_s, q_s はゆるやかに減少している。また表面粗さ $(R_{\max})_s, (R_{\max})_f$ も V の増加とともに減少する。しかし砥石摩耗速度 C_0 は V の増加とともに増加している。ここで C_0 が増加するのは、速度比 K_v と設定砥石切込み量 Δ を一定にしているた

Fig. 12 Effects of relative grinding speed on grinding results

Fig. 13 Dresser wear

Fig. 14 Effects of dresser wear on size generation processes

め V が増加すると金属除去速度が増加するためであり、それにもかかわらず研削抵抗と表面粗さが減少するのは、速度効果によってフリーカッティングが行われるようになるためと考えられる。

8. ドレッサ摩耗の影響

一般にドレッサの摩耗は、ドレッシングによって生成される砥石作用面の性状に大きな影響を与え、ひいては研削結果を左右する⁵⁾。このため、通常の単石ドレッシングにおいては、ドレッサが摩耗すると回転して新しい面を出して使用する。しかし、その度に研削結果は大きく異なり、ことにドレッシング摩耗幅が小さい場合には研削結果の変動は著しい。図 13 は、本報告で用いたカップ型ダイヤモンド砥石で、鋭利なドレッサ A と使用して鈍くなったドレッサ B の先端形状を示すものであり、ドレッサ B はドレッサ A より $139 \times 10^3 \text{ mm}^3$ ドレッシングした後の状態である。この状態の 2 つのドレッサを用いて、同一のドレッシング条件、同一の研削条件で円筒プランジ研削を行った場合の寸法生成曲線を図 14 に示す。図より明らかに、ドレッサが摩耗しても寸法生成過程はほとんど変化がなく、また図中に示したように、定常研削背分力、砥石摩耗速度、切残し量、表面粗さもほぼ等しい。さらに、過渡研削時間 t_s 、有効スパークアウト研削時間 t_r もあまり変化がない。このように多石回転形ドレッシングでは、ドレッサの摩耗は研削結果には大きな影響を与えず、研削結果が安定しているので、実用上たいへん有利であると考えられる。

9. 結 論

カップ型ダイヤモンド砥石を用いた多石回転形ドレッシング法を提案して、その設置条件、ドレッシング条件、研削加工条件などが研削性能に及ぼす影響を実験的に解明した。本研究で得られた主な結論は以下のようである。

- (1) 多石回転形ドレッシングを施した砥石作用面上には、単石の場合に比べて切れ刃数はやや少ないが、鋭利な切れ刃が出現する。
- (2) 多石回転形ドレッシングでは、ドレッサの取付状態が研削結果に影響を与えるので、その設定には注意を払う必要がある。
- (3) 多石回転形ドレッシングを施した場合、研削抵抗は単石の場合よりも小さいが、表面粗さ、砥石摩耗速度は大きい。
- (4) 多石回転形ドレッシングでは、ドレッサの摩耗は研削結果に大きな影響を与えないので実用上有利である。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金によって行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 中島利勝, 宇野義幸, 世俣秀樹: 研削砥石のドレッシングに関する研究 (第 1 報) —— 単石回転形ドレッシング, 精密機械, 49, 2 (1983) 228.
- 2) 中島利勝: プランジ研削過程の研究 (第 1 報) —— 研削サイクルの解析, 精密機械, 41, 11 (1975) 1066.
- 3) 岡村健二郎, 中島利勝, 渡辺 潔: 過渡的切削現象の解析を基にした研削理論 (第 3 報) —— 接触剛性に起因する切残し量, 精密機械, 36, 4 (1970) 241.
- 4) 中島利勝, 岡村健二郎, 木下輝一: 研削の過渡特性 (第 3 報) —— 寸法生成過程, 精密機械, 40, 3 (1974) 256.
- 5) 砥粒加工研究会: 砥粒加工技術便覧, 日刊工業新聞社 (1965) 249.