レジノイド砥石の研削性能に関する研究（第2報）*

—アルミニウム粉混入無気孔砥石の研削性能—

中 島 利 勝** 宇 野 義 幸** 茅 原 雅 之***

Grinding Performance of Resinoid Wheel (2nd Report)

—Grinding Performance of Resinoid Bonded Poreless Wheel with Aluminium Powder—

Toshikatsu NAKAJIMA, Yoshiyuki UNO and Masayuki KAYAHARA

Grinding performance of resinoid bonded poreless wheel with aluminium powder is experimentally investigated in cylindrical plunge grinding, analyzing grinding force, wheel wear, grinding temperature, work surface temperature and so on. Main results obtained in this paper are as follows: (1) Variation processes of grinding temperature and work surface temperature in a plunge grinding cycle are similar to that of grinding force. (2) An increase of aluminium powder content leads to lower grinding temperature, work surface temperature, grinding force and wheel wear. (3) The finer the grain size of wheel is, the lower grinding temperature, work surface temperature and grinding force become. (4) Grinding temperature has a close relation to tangential grinding force.

Key words: resinoid wheel with aluminium powder, grinding performance, grinding temperature, work surface temperature, grinding force, wheel wear

1. 結 言

本研究は、従来のレジノイド砥石の欠点を改善し、粗研削から精密研削まで広範囲に使用されうる高性能レジノイド砥石の開発を目的とする。前報¹⁾では、結合剤であるフェノール樹脂中に熱伝導率の高いアルミニウム粉を混入し無気孔とした、アルミニウム粉混入無気孔レジノイド砥石（略称 APPLE 砥石）を開発し、その機械的特性、熱的特性などを明らかにした。また PVA 砥石を用いた新しいドレッシング法を導入して、無気孔砥石の切れ刃生成過程を明らかにしたのち、若干の研削実験を行って APPLE 砥石の有効性についても検討した。

本報告は、この APPLE 砥石を用いて、一連の円筒プランジ研削実験を行い、主に研削熱の観点から研削性能を実験的に検討したものである。すなわち、本報告で用いる砥石研削点温度、工作物表面温度を定義したのち、アルミニウム粉の混入が研削抵抗、砥石摩耗、砥石研削点温度、工作物表面温度などに及ぼす影響を実験的に解明すると

ともに、砥粒粒度および研削加工条件が研削結果に及ぼす影響についても検討した。

2. 実 験 方 法

研削実験は、前報と同様に PVA 砥石によって目出しを行った APPLE 砥石に一定条件のドレッシングを施したのち、円筒プランジ方式で行った。本研究に用いた実験装置の概要を図 1 に示す。研削抵抗は工作物支持センタに貼付したひずみゲージによって、また工作物半径減少量はプランジャ型のスタイラスを介して電気マイクロメータで検出した。研削温度は図 2 に

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

* 原稿受付 昭和 59 年 10 月 19 日。昭和 59 年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和 59 年 10 月 3 日)にて発表

** 正 会 員 岡山大学工学部(岡山市津島中 3-1-1)

*** 正 会 員 住友電気工業(株)(伊丹市昆陽北 1-1-1)

Fig. 2 Details of A in Fig. 1

示すように、工作物中に直径 0.076 mm のコンスタンタン線をポリ塩化ビニリデンのフィルム（厚さ 0.01 mm）で絶縁して埋め込み、砥石が工作物を研削する際に、コンスタンタン線と工作物（S45C）が接触して熱電対の高温接点を形成することを利用して検出し²⁾、スリッピングを介して一旦データレコーダに入れたのち、必要に応じてシンクロスコープまたはペンレコーダに記録して解析を行う。また、後処理のために、砥石と熱電対が接触する直前にトリガ信号が入るようにフォトセンサを取り付けてある。なお、熱電対は別途、工作物と同一材種の針金を作製して、電気炉を用いて検定しておく。

今回実験に用いた APPLE 砥石は、アルミニウム粉混入率が研削結果に及ぼす影響をみるために、SA 60-30-20, SA 60-30-30, SA 60-30-40（いずれも砥粒は SA 60 番、砥粒率 $V_g=30\%$ であり、アルミニウム粉混入率 $V_f=20, 30, 40\%$ と変化させてあることを示す。なお無気孔砥石であるから残りは結合剤率 V_b となる）の 3 種類および砥粒粒度の影響を調べるために、SA 36-30-30, SA 60-30-30, SA 100-30-30 の 3 種類、計 6 種類である。図 3 は、前報で測定した熱伝導率 λ とアルミニウム粉混入率 V_f との関係を示すものである。図より明らかなように、砥粒率 V_g 一定でアルミニウム粉混入率 V_f を増加させた場合には、 V_f の増加とともに熱伝導率 λ は急激に増加していく。これに対して砥粒率 V_g 、アルミニウム粉混入率 V_f を一定にして、砥粒粒度を変化させた場合には、熱伝導率 λ は変化せずにはば一定値を示している。主な研削条件は以下のようである。

研削方式：円筒プランジ研削

研削砥石：APPLE 砥石（ $\phi 405 \times 50$ mm）

工作物：S45C（ $\phi 120 \times 10$ mm）

砥石速度： $V_s=45$ m/s

速度比： $K_v = V_w/V_s = 0.004 \sim 0.018$

Fig. 3 Effect of aluminium powder content on thermal conductivity

Fig. 4 Temperature distribution in contact area between wheel and workpiece

システム剛性： $k_{sy}=7.5$ MN/m

プランジ速度： $v_p=0.5 \sim 5$ $\mu\text{m/s}$

ドレッシング条件：切込み 10 $\mu\text{m} \times$ 送り 0.1 mm/rev

研削液：ソリュブル形，30 L/min

3. プランジ研削サイクルと研削温度

研削熱は個々の砥粒が工作物を切削する際に発生するものであり、これは工作物の熱変形や加工変質層の生成に影響し、またレジノイド砥石の場合は結合剤のフェノール樹脂の炭化による砥石摩耗³⁾にも影響を及ぼす。一方、砥石と工作物とは巨視的にみると、ある接触面積を有しており、この面内の温度は図 4 に示すような分布をしているといわれている⁴⁾。本報告においては、この最高温度 $\Delta\theta_{max}$ を砥石研削点温度と定義する（ Δ は室温からの上昇を表す）。図 5 は、データレコーダからシンクロスコープへ出力した記録例で、(A) は時間軸を 0.5 s/div、また (B) は 1 ms/div としたものである。(A) より熱パルスは 1 s ごとに規則正しく出されており（この場合、工作物回転数は 60 rpm）、また (B) よりこのパルスは 1 ms 程度で急激に

Fig. 5 Measurement of heat pulse

Fig. 6 Grinding temperature and work surface temperature

上昇して最高値 $\Delta\theta_{\max}$ に到達し、その後きわめて短時間に室温付近まで下がっていることがわかる。工作物上のある一点について考えてみると、上述のように工作物1回転に一度、砥石と接触する際に接触面で熱を供給されたのち冷却されるが、流入するエネルギーが取り去られるエネルギーよりも多いために、工作物の表面温度は徐々に上昇する。図6は、その状態を模式的に示したもので、工作物の表面温度 $\Delta\theta_w$ は工作物1回転に一度ずつ熱パルスを加えられながら上昇していき、定常状態に到達する。図中 $(\Delta\theta_w)_s$ 、 $(\Delta\theta_{\max})_s$ はそれぞれ定常状態における工作物表面温度、砥石研削点温度を示しており、以後の解析に用いられる。図7は、データレコーダからペンレコーダへ出力した工作物表面温度 $\Delta\theta_w$ の記録例である(この場合、砥石研削点温度 $\Delta\theta_{\max}$ に相当するパルスは、ペンレコーダの応答速度が低いために、その絶対値については正確な値は表していない)。なおこの図より明らかなように、有効スパークアウト完了(F点)以後も熱パルスが出力さ

SA60-30-30, $K_v=0.004$, $\Delta=3\mu\text{m/rev}$ of workpiece, With coolant

Fig. 7 Measurement of variation process of work surface temperature

Fig. 8 Variations of grinding force, grinding temperature and work surface temperature in a plunge grinding cycle

れている。この領域では工作物除去は行われず、砥石と工作物は弾性的に接触しているだけの状態となっている⁵⁾。

図8は、プランジ研削サイクルにおける砥石研削点温度 $\Delta\theta_{\max}$ 、工作物表面温度 $\Delta\theta_w$ および研削背分力 p 、研削主分力 q の変化過程を示す。図より明らかなように、砥石研削点温度 $\Delta\theta_{\max}$ および工作物表面温度 $\Delta\theta_w$ は研削抵抗 p, q と同様の变化をしている。すなわち、過渡研削状態ではかつぎ現象⁶⁾によって実砥石干渉量が増加するのに伴って研削抵抗は増加するが、同時に砥石研削点温度 $\Delta\theta_{\max}$ も上昇していく。工作物表面温度 $\Delta\theta_w$ は応答が少し遅れて現れるため、やや変化形態が異なるが同様に上昇していく。実砥石干渉量が一定になると研削抵抗 p, q は一定となり、同時に砥

Fig. 9 Effect of aluminium powder content on grinding force

石研削点温度 $\Delta\theta_{\max}$ および工作物表面温度 $\Delta\theta_w$ も一定値となる。研削系かつぎ量が解放されていくスパークアウト研削状態では、研削抵抗、砥石研削点温度、工作物表面温度もそれぞれ低下していく。APPLE 砥石の場合、工作物表面温度が室温に戻るにはかなりの時間が必要であり、有効スパークアウト時間も長いようである。研削抵抗は研削エネルギーと直接関係する値であり、このように砥石研削点温度 $\Delta\theta_{\max}$ および工作物表面温度 $\Delta\theta_w$ が研削抵抗と同様な変化過程を示すことは、これらの値が研削エネルギーと密接な関係を有していることを示している。なお定常状態における砥石研削点温度 $(\Delta\theta_{\max})_s$ は、図より明らかなようにに多少の変動があるので、その平均値 $\overline{(\Delta\theta_{\max})_s}$ を用いて以下の解析を行っている。

4. アルミニウム粉混入率が研削結果に及ぼす影響

図9は、アルミニウム粉混入率 V_f と定常状態における研削背分力 p_s および研削主分力 q_s との関係を、また図10は、アルミニウム粉混入率 V_f と実砥石干渉量 d_s 、切残し量 $(d_r)_s$ 、砥石-工作物支持系の弾性変位量 $(d_i)_s$ および砥石摩耗速度 C_o との関係をそれぞれ示したものである。既に前報¹⁾で明らかにしたように、アルミニウム粉混入率 V_f を増加させると、熱伝導率 λ が高くなるとともに弾性率 E も増加する。これらの図より明らかなように、アルミニウム粉混入率 V_f が増加すると、弾性率 E が増加して切れ刃支持剛性が大きくなる結果、切残し量 $(d_r)_s$ および実砥石干渉量 d_s は小さくなる。またそのために、実砥石干渉量と密接な関係を有する研削抵抗 p_s, q_s も小さくなる。図10において弾性変形量 $(d_i)_s$ が減少するのは、これを決

Fig. 10 Effect of aluminium powder content on some characteristic values

Fig. 11 Effect of aluminium powder content on grinding temperature

定する研削背分力 p_s が減少するためである。また砥石摩耗速度 C_o の値は、一般のレジノイド砥石の場合よりもかなり小さく、ビトリファイド砥石の場合に近い値である²⁾ことから、この場合はフェノール樹脂の炭化による砥石摩耗は生じていないものと考えられる。図11は、砥石研削点温度 $(\Delta\theta_{\max})_s$ に及ぼすアルミニウム粉混入率 V_f の影響を、また図12は、工作物表面温度 $(\Delta\theta_w)_s$ に及ぼすアルミニウム粉混入率の影響をそれぞれ示すものである。これらの図より明らかなように、砥石研削点温度および工作物表面温度はアルミニウム粉混入率 V_f が増加するほど低下し、またプランジ速度 v_p が増加するほど高くなる。ここで、これらの値がアルミニウム粉混入率 V_f の増加とともに低下するのは、弾性率 E の増加によって研削抵抗が減少する効果と、熱伝導率 λ の増加によって砥石側へ研削熱がより多く流入する効果の2つが含まれていると考えられる。図13および図14は、それぞれ研削主分力 q_s と砥石研削点温度 $\overline{(\Delta\theta_{\max})_s}$ および研削主分力 q_s と工作物表面温度 $(\Delta\theta_w)_s$ との関係を示すものであ

Fig. 12 Effect of aluminium powder content on work surface temperature

Fig. 13 Relation between grinding temperature and tangential grinding force for three different wheels of aluminium powder content

Fig. 14 Relation between work surface temperature and tangential grinding force for three different wheels of aluminium powder content

る。研削エネルギーは研削主分力と研削速度との積によって与えられるから、この場合横軸は研削エネルギーと直接的に関係する値である。これらの図より明らかなように、同一砥石では研削主分力 q_s が増加するとともに、砥石研削点温度、工作物表面温度はそれぞ

Fig. 15 Grinding temperature for three different wheels of grain size

Fig. 16 Relation between grinding temperature and tangential grinding force for three different wheels of grain size

れ一定の線に沿って上昇していく。しかし砥石が異なる場合には、同一研削主分力すなわち同一研削エネルギーが加えられても砥石研削点温度および工作物表面温度は異なり、熱伝導率 λ の大きな砥石ほどこれらの値は低くなっている。これは、熱伝導率 λ の大きな砥石で研削する場合ほど、接触面内で発生した研削熱をより多く砥石側へ逃がすことができるためと考えられる。

5. 砥粒粒度が研削結果に及ぼす影響

図 15 は、砥石研削点温度 $(\Delta\theta_{\max})_s$ とプランジ速度 v_p との関係を、粒度を変化させた 3 種類の砥石に対して示すものである。ここで 36 番の砥粒に対しては、 $v_p=1 \mu\text{m/s}$ より大きなプランジ速度では激しいびびりを生じて研削が不可能であった。図より明らかなように、砥石研削点温度は砥粒が粗くなるほど、またプランジ速度が増加するほど高くなっている。図 16 は、上記の実験点をその時に発生する研削主分力 q_s を横軸にとって整理しなおしたものである。図より明らかなように、研削主分力 q_s の増加とともに、各砥石とも砥石研削点温度はそれぞれ一定の線に沿って上昇しているが、砥石が異なる場合には、同じ研削主分力 q_s に

Fig. 17 Grinding temperature under various grinding conditions

Fig. 18 Relation between grinding temperature and tangential grinding force

対しても砥石研削点温度は異なっており、砥粒が細かいほど低い値となっている。粒度のみが異なる場合には、前述のように、熱伝導率 λ はほぼ同じ値を示しており、この差は砥石と工作物間の接触領域内に存在する砥粒数に起因すると考えられる。すなわち砥粒率 V_g 一定のもとでは、使用砥粒が細かいほど同時作用砥粒数が多くなり、これらの砥粒を通じてより多くの熱が砥石側へ流入するためであると考えられる。

6. 研削加工条件が研削結果に及ぼす影響

図17は、砥粒SA60、砥粒率 $V_g=30\%$ 、アルミニウム粉混入率 $V_f=30\%$ のAPPLE砥石を用いて、工作物1回転あたりの設定砥石切込み量 Δ および速度比 K_v を組織的に変化させた場合の砥石研削点温度 $(\Delta\theta_{\max})_s$ を示すものである。図より明らかなように、砥石研削点温度は速度比 K_v および設定砥石切込み量 Δ が増加するほど高くなる。これは速度比 K_v および設定砥石切込み量 Δ の増加とともに幾何学的切りくず形状が大形化して、研削エネルギーが増加する⁹⁾ためである。図18は、上記の結果を横軸に研削主分力 q_s をとって整理しなおしたものである。図より同一砥石を用いた場合には、研削条件を種々変化させても、

研削主分力 q_s すなわち研削エネルギーと砥石研削点温度とは一義的な関係を有することがわかる。

7. 結 論

新しく開発したアルミニウム粉混入無気孔レジノイド砥石(APPLE砥石)の研削性能を実験的に検討した結果、得られた主な結論は以下のようである。

- (1) プランジ研削における砥石研削点温度、工作物表面温度の変化過程には、研削抵抗と同様の過渡、定常、スパークアウトの3つの状態が存在する。
- (2) アルミニウム粉混入率が増加するほど、砥石研削点温度、工作物表面温度は低下し、また研削抵抗も減少する。
- (3) アルミニウム粉混入率が増加するほど、実砥石干渉量、切残し量、弾性変形量および砥石摩耗速度は減少する。
- (4) 砥粒粒度が細くなるほど、砥石研削点温度、工作物表面温度は低下し、また研削抵抗も減少する。
- (5) 同一砥石では、研削主分力と砥石研削点温度は一義的な関係を有しており、主分力が増加するほど砥石研削点温度も高くなる。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金（試験研究(2)）によって行われたことを付記する。

最後に本実験に使用したAPPLE砥石の作製に便宜を図って頂いた(株)ノリタケカンパニーリミテドに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 中島利勝, 宇野義幸, 森谷 守: レジノイド砥石の研削性能に関する研究(第1報)——アルミニウム粉混入無気孔砥石の特性, 精密機械, 47, 10 (1981) 1240.
- 2) J. Peklenik: Der Mechanismus des Schleifens und die Überschliffzahl, Ind.-Anz., 80, 1-3, (1958) 20.
- 3) 砥粒加工研究会: 砥粒加工技術便覧, 日刊工業新聞社(1965) 39.
- 4) 高沢孝哉: 研削面表層温度分布の理論とその測定法——研削温度に関する理論的解析(第1報), 精密機械, 30, 11 (1964) 851.
- 5) 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.
- 6) 岡村健二郎, 中島利勝: 研削の過渡特性(第1報)——かつぎ現象の解明, 精密機械, 38, 7 (1972) 580.
- 7) 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.
- 8) 中島利勝, 三好弘二, 鈴木秀雄, 秋沢英男, 小林博人: 研削砥石の切れ味に関する研究(第2報)——砥石組成と切れ味, 精密機械, 44, 8 (1978) 981.
- 9) 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.