研 削 の 過 渡 特 性 (第 2 報)*

— 加工条件の影響 —

岡村 健二郎** 中 島 利 勝**

Transient Characteristics in Grinding (2nd Report)

—Effects of Grinding Conditions—

Kenjiro OKAMURA, Toshikatsu NAKAJIMA

An accumulation phenomenon in grinding leads to the existence of three distinct states in a grinding cycle, a state of spark-in grinding at the beginning of grinding, a steady state and a state of spark-out grinding after stopping the infeed of grinding wheel.

The purpose of this study is to get a foundation for scientific understanding of grinding process by analyzing the transient characteristics in grinding and combining the analysis with that of grinding process in the steady state.

In this paper discussed is effects of such grinding conditions upon the transient characteristics as speed ratio, grinding speed, stiffness of grinding system, wheel grade and dressing conditions. It has been made clear that both spark-in and spark-out grinding time decrease with increasing speed ratio and grinding speed, with higher stiffness of grinding system, with weaker grade of wheel and with coarser dressing.

1. 緒 言

工作物 1 回転あたりの砥石切込み深さが、コンマ数 μ から数 μ のオーダーで与えられるように、プランジ速度を選定して進められるプランジ研削過程においては、砥石と工作物との接触の初期段階において、一つの砥石切れ刃の最大干渉深さはきわめて小さく、したがって切れ刃は工作物と弾性的に接触 (E 型接触) するのみであり、切削はされない¹⁾。しかし、砥石は一定速度で進行してくるために、累積効果によって、実砥石干渉深さは研削時間とともに増加し、それがある値になると、砥粒切れ刃と工作物との接触形態が P 型に変化し²⁾、塑性変形によって工作物表面には溝が生成され始めるが、切削作用は存在しないから、工作物半径は減少しない。研削時間とともに、実砥石干渉深さがさらに増加して、それがある値になると、砥粒切れ刃と工作物との接触形態は C 型に変化し³⁾、工作物が切りくずとして排除され始め、したがって工作物半径が減少し始めるが、その初期においては、工作物半径の減少速度がプランジ速度に比べて小さいために、この領域においても、実砥石干渉深さは研削時間とともに増加する。実砥石干渉深さが、工作物 1 回転あたりの設定砥石切込み量に比べてかなり大きくなっ

て、工作物 1 回転あたりの半径減少量が、工作物 1 回転あたりの設定砥石切込み量に等しくなると、実砥石干渉深さは一定となり、定常状態に入る。この定常研削状態において、砥石の送りを停止すると、スパークアウト研削状態となり、実砥石干渉深さは研削時間とともに減少するが、スパークアウト研削を長くやっても実砥石干渉深さは 0 とならず、研削系の剛性、接触剛性、相互干渉形状などによって決まるある一定値に収束する²⁾。

このような砥石切れ刃と工作物との接触形態の変化を伴う実砥石干渉深さの変化過程を、研削加工のかつき現象といい、実砥石干渉深さを砥石かつき量、砥石かつき量と砥石軸および工作物支持部の変位との和を研削系のかつき量、砥石かつき量と工作物 1 回転あたりの設定砥石切込み量との比をかつき比と定義する。砥石かつき量は、研削抵抗、研削温度、仕上面あらさなど研削理論で取扱われる各種の値を解析する場合に基礎となるものであり、研削系のかつき量は、切削能率、仕上寸法精度など実際の研削効果を知るために重要な値である。また、かつき比は、研削におけるかつき現象の認識の必要性を表現する値である。

本研究においては、このかつき現象に起因する研削の過渡特性すなわち過渡研削現象、およびスパークアウト研削現象を解明し、定常状態における研削現象の解析³⁾⁻⁵⁾と、それとを結合することによって、研削現象を本質的に理解するための基礎を明らかにしようとする。

* 原稿受付 昭和 47 年 5 月 24 日。昭和 47 年度精機学会春季大会学術講演会 (昭和 47 年 4 月 6 日) にて発表。

** 正 会 員 京都大学工学部 (京都市左京区吉田本町)

表1 研削加工実験条件

	速度比 K_V	砥石速度 $V(\text{m/min})$	研削系の剛性 $k_w(\text{kg/mm})$	砥石	ドレッシング条件 (切込み×送り)
速度比の影響	0.0162~0.083	1744	880	WA 60 LV*	$20\mu \times 0.2\text{ mm/rev}$
相対研削速度の影響	0.1	1620~5120	—	WA 150 KV	$10\mu \times 2\text{ mm/s}$
研削系の剛性の影響	0.0281	1744	420~2880	WA 60 LV	$20\mu \times 0.2\text{ mm/rev}$
結合度の影響	0.0281	1744	2880	WA 60 (H, L, P) V	$20\mu \times 0.2\text{ mm/rev}$
ドレッシング条件の影響	0.0281	1744	2880	WA 60 PV	$5\mu \times 0.5\text{ mm/rev} \sim 40 \times 0.4$

* 製造会社の異なる砥石

のである。このような観点から、前報²⁾においては、研削加工におけるかつぎ現象の概念を明らかにした。本報告においては、プランジ研削における過渡、定常およびスパークアウト研削状態での研削抵抗の変化や、過渡研削時間およびスパークアウト研削時間を検討することによって、研削加工条件が、研削の過渡特性に及ぼす影響を明らかにする。

2. 実験方法

研削抵抗は、かつぎ現象と密接な関係を有するので、本研究においては、研削抵抗の変化曲線より、研削加工条件が研削の過渡特性に及ぼす影響を実験的に検討した。

変化させた研削加工条件は、砥粒切れ刃と被削材との相互干渉形状を決定する要因である工作物と砥石との速度比 K_V 、相対研削速度 V 、砥石軸および工作物支持部の変位に起因する切残し量 d_1 を決定する研削系の剛性 k_{sy} 、接触剛性に起因する切残し量 d_2 に影響する砥石結合度、および同時作用切れ刃数および仕上面あらさに関する切残し量 d_3 に影響するドレッシング条件の5種類である。

研削系の剛性 k_{sy} を変化させるにあたっては、砥石軸の剛性を $k_s = 3000\text{ kg/mm}$ と一定にして、工作物支持部の剛性 k_w を変化させた。また、工作物1回転あたりの砥石切込み量 d の設定にあたっては、砥石台の移動量を微小変位計で検出し、それを研削時間に対して記録することによって決定した。

表1は、研削加工条件の変化範囲を示す。また、本実験に供した工作物は、炭素鋼 (S 45 C) $120\text{ mm}\phi \times 30\text{ mm}$ であり、研削液としてはシムクールを用いた。

3. 実験結果とその検討

プランジ研削によって被削材を加工する場合、一般に研削サイクル中には、すでに述べたように、砥石が被削材と接触した瞬間から、過渡、定常およびスパークアウトの三つの異なった研削状態が存在する。

過渡研削状態においては、研削時間とともに砥石かつぎ量が増加し、それに伴って研削抵抗も増加するから、研削系のかつぎ量も研削時間とともに増加する。また、かつぎ比は、砥石と被削材とが接触した瞬間においては1であり、研削時間とともに増加していく。

定常研削状態は、工作物1回転あたりの設定砥石切込み量 d と工作物半径の減少量とが平衡している状態であり、したがって定常状態においては、砥石かつぎ量 d_s は一定であるから、研削抵抗 P_s も一定となり、研削系のかつぎ量 d_g およびかつぎ比 d_s/d も、次式で与えられる一定値をとる^{3)~5)}。

$$d_s = d + d_2 + d_3 \quad (1)$$

$$d_g = d_s + d_1 = d_s + P_s/k_{sy} \quad (2)$$

$$d_s/d = 1 + (d_2 + d_3)/d \geq 1 \quad (3)$$

ここで、 d_1 は砥石軸および工作物支持部の変位に起因する切残し量、 d_2 は接触剛性に起因する切残し量、 d_3 は仕上面あらさに関する切残し量、また k_{sy} は研削系の剛性である。

また、スパークアウト研削状態は、過渡研削状態において累積され、定常研削状態において一定に保持されていた砥石かつぎ量および研削系のかつぎ量を解放する状態であり、したがって、スパークアウト研削状態では、過渡および定常研削と異なり、圧力切込みで被削材を除去することになる。

3.1 速度比 K_V の影響

工作物と砥石との速度比 K_V は、研削加工における切りくず形状を決定する値であり、特に研削現象を過渡的切削過程という観点より解明する場合に重要な値である。

図1は、工作物1回転あたりの設定砥石切込み量 d を一定にして、速度比 K_V を変化させた場合の過渡研削状態における背分力 P の研削時間 t に対する変化を示す。

この図よりわかるように、背分力 P は、研削時間とともに増加し、ある研削時間で定常研削状態に入り一定値を示すが、速度比 K_V が大きいほど、定常状態における背分力 P_s が大きいにもかかわらず、定常状態になるまで

図1 過渡研削状態における背分力に及ぼす速度比の影響

図2 過渡研削時間に及ぼす速度比の影響

の研削時間は短い。このことは、速度比 K_V が大きいほど、過渡研削状態における砥石かつぎ量およびその増加速度が大きいことを意味する。

図2は、砥石と工作物が接触してから定常状態になるまでの研削時間、すなわち過渡研削時間 t_s に及ぼす速度比 K_V の影響を示す。図よりわかるように、速度比 K_V が大きいほど、過渡研削時間 t_s は短くなり、したがって速度比 K_V を増加することによって、研削サイクルを短縮することができる。

図3は、定常研削背分力 P_s に及ぼす速度比 K_V の影響を示す。図よりわかるように、速度比 K_V が増加すると砥石かつぎ量 d_s が大きくなるために、定常研削背分力は、速度比が大きいほど大きい。このことは、定常状態における砥石かつぎ量 d_s が式(1)で与えられ、速度比 K_V が増加すると、仕上面あらさがあらかなり⁴⁾、したがって仕上面あらさに関する切残し量 d_3 が大きくなる

図3 定常研削背分力に及ぼす速度比の影響

図4 スパークアウト研削状態における背分力に及ぼす速度比の影響

こと、および接触剛性に起因する切残し量 d_3 も一般に速度比 K_V が大きいほど大きくなる³⁾ことより理解されうる。

図4は、スパークアウト研削状態における背分力の研削時間に対する変化を示す。スパークアウト研削は、すでに述べたように、砥石かつぎ量と研削系のかつぎ量の減少によって進行するために、圧力切込み研削となり、背分力は、スパークアウト研削時間とともに、設定砥石切込み量 Δ が異なっても同一曲線に沿って減少する²⁾、速度比 K_V が大きいほど、背分力の減少割合は大きくなる。このことは、速度比 K_V が大きくなると、砥粒切れ刃の切込み角 i_g が大きくなるために⁶⁾、研削現象が改善されること、および速度比 K_V が大きいほど、工作物の回転数が大きく、したがって、単位時間あたりの研削量が大きくなることより理解されうる。したがって、スパークアウト研削時間 t_f は、速度比 K_V が大きいほど短

図5 過渡研削時間と研削速度との関係

図6 過渡研削状態における背分力に及ぼす研削系の剛性の影響

くなる。

図5は、速度比 K_v および設定砥石切込み量 Δ を一定にした場合の過渡研削時間 t_s に及ぼす相対研削速度 V の影響を示す。図より明らかなように、研削速度が増加すると、過渡研削時間は短縮される。また、研削速度が増加すると、仕上面あらさが改善されるために⁷⁾、仕上面あらさに関する切残し量 d_s が減少し、かつ接触剛性に起因する切残し量 d_2 も減少するために⁸⁾、定常状態における砥石かつぎ量 d_s が小さくなり、したがって定常研削背分力 P_s は、相対研削速度 V の増加とともに減少する。

3.2 研削系の剛性の影響

研削系の剛性は、切残し量 d_1 を直接支配する値であり、したがって研削系の剛性の影響を検討することは、切残し量 d_1 が研削の過渡特性に及ぼす影響を検討することにほかならない。

図6は、工作物支持部の剛性 k_w を変化させた場合の過渡研削状態における背分力 P の研削時間に対する変化

図7 定常研削背分力に及ぼす研削系の剛性の影響

図8 仕上面あらさに及ぼす研削系の剛性の影響

を示す。工作物1回転あたりの設定砥石切込み量 Δ を固定した場合、その一部は、砥石軸および工作物支持部の変位によって吸収され、その吸収量は、当然、研削系の剛性が低いほど大きくなるから、実質的な砥石切込み量の増加は、研削系の剛性が低いほど小さくなり、工作物半径の減少速度も、研削系の剛性が低いほど小さくなると考えられる。したがって、砥石かつぎ量の増加速度は、研削系の剛性が低いほど小さくなり、図より明らかなように、背分力の増加も、工作物支持部の剛性 k_w が低いほどゆるやかである。

図7は、定常研削背分力 P_s に及ぼす研削系の剛性の影響を示す。図より明らかなように、定常研削背分力 P_s は、研削系の剛性によって影響されない。このことは、定常状態における砥石かつぎ量 d_s が、研削系の剛性に対して一定となることを意味する。すでに述べたように、定常状態における砥石かつぎ量 d_s は、式(1)で与えられるが、接触剛性に起因する切残し量 d_2 は、その定義から明らかなように、研削系の剛性によって影響されない⁸⁾。一方、仕上面あらさ R_{max} は、図8に示すように、研削系の剛性が変わっても変化せず、したがって、仕上面あらさに関する切残し量 d_s も、研削系の剛性によって影響されない。これらのことより、定常状態にお

図9 スパークアウト研削時間に及ぼす研削系の剛性の影響

ける砥石かつぎ量 d_s は、研削系の剛性によって影響されず、したがって研削系の剛性が変化しても、定常研削背分力 P_s は変化しないことがわかる。しかし、研削系のかつぎ量 d_g は、研削系の剛性によって影響され、研削系の剛性が高いほど小さくなることは、式(2)より明らかである。また、過渡研削時間 t_s は、図6よりわかるように、研削系の剛性が高いほど短くなる。

図9は、スパークアウト研削時間 t_f に及ぼす研削系の剛性の影響を示す。図より明らかなように、研削系の剛性が高いほど、スパークアウト研削時間は短くなる。このことは、スパークアウト研削が、研削系のかつぎ量 d_g の減少によって進行し、研削系のかつぎ量 d_g は、研削系の剛性が高いほど小さいこと、および砥石かつぎ量の減少速度が、研削系の剛性が高いほど大きいことより理解される。

3.3 砥石結合度の影響

砥石の結合度が異なると、砥石作用面上における切れ刃数および切れ刃支持剛性が異なるから⁸⁾、砥石結合度は、切残し量 d_1 、 d_2 および d_3 に影響を及ぼすことになる。

図10は、過渡研削状態における背分力 P の研削時間 t に対する変化に及ぼす結合度の影響を示す。図よりわかるように、砥石結合度が高いほど、背分力 P の変化は急激である。しかし、このことは、砥石結合度が高くなると砥石かつぎ量が大きくなることを意味するのではなく、砥石結合度が異なると、切れ刃の状態および同時作

図10 過渡研削状態における背分力に及ぼす結合度の影響

図11 定常研削背分力に及ぼす結合度の影響

用切れ刃数が異なることに起因すると考えられる。

図11は、定常研削背分力 P_s に及ぼす砥石結合度の影響を示すものである。図より、砥石結合度が高いほど、定常研削背分力 P_s は大きくなる。いま、定常状態における砥石かつぎ量 d_s は、式(1)で与えられるが、砥石結合度が高くなると、切れ刃支持剛性が高くなる⁸⁾ために、接触剛性に起因する切残し量 d_2 は小さくなり⁶⁾、また仕上面あらさ R_{max} も小さくなるから、仕上面あらさに関する切残し量 d_3 も小さくなる。したがって、定常砥石かつぎ量 d_s は、砥石結合度が高くなるほど小さくなる。それにもかかわらず、砥石結合度が高いほど、定常研削背分力 P_s が大きくなるのは、同じドレッシングを施しても、結合度が高いほど同時作用切れ刃数が多くなるためであると考えられる。したがって、切れ刃の状態および切れ刃数が異なる場合には、砥石かつぎ量と研削抵抗との関係を一義的に論ずることができなくなる。

この場合、図10よりわかるように、砥石結合度が高いほど、過渡研削時間 t_s は長くなる。図12は、スパークアウト研削時間 t_f に及ぼす砥石結合度の影響を示し、

図 12 スパークアウト研削時間に及ぼす結合度の影響

図 13 過渡研削状態における背分力に及ぼすドレッシング条件の影響

砥石結合度が高くなるほど、スパークアウト研削時間は長くなる。このことは、スパークアウト研削が、定常状態における研削系のかつき量 d_g の減少によって進行し、砥石結合度が高いほど、研削系のかつき量 d_g が大きいこと、およびその減少割合が小さいことより理解される。

3.4 ドレッシング条件の影響

ドレッシング条件は、砥石作用面の切れ刃数および切れ刃支持剛性に影響を及ぼし、細かいドレッシングを施すほど、切れ刃数は多くなり、切れ刃の支持剛性が高くなる⁸⁾。

図 13 は、過渡研削状態における背分力 P の変化に及ぼすドレッシング条件の影響を示す。図よりわかるよう

図 14 定常研削背分力に及ぼすドレッシング条件の影響

図 15 スパークアウト研削時間に及ぼすドレッシング条件の影響

に、細かいドレッシングを施すほど、背分力 P の変化は急激である。このことは、ドレッシング条件が異なれば、切れ刃の状態および切れ刃数に変化すること起因するものであり、細かいドレッシングを施した場合に、砥石かつき量が大きくなることを意味するのではない。

図 14 は、定常研削背分力 P_s に及ぼすドレッシング条件の影響を示すものであり、ドレッシングが細かいほど定常研削背分力 P_s は大きくなることからわかる。

すでに述べたように、定常状態における砥石かつき量 d_s は、式(1)によって与えられるが、ドレッシングが細かくなると、切れ刃支持剛性が高くなるために、接触剛性に起因する切残し量 d_2 は小さくなり、また仕上面あらかさ R_{max} が小さくなるために、仕上面あらかさに関する切残し量 d_3 も小さくなる。したがって、定常状態における砥石かつき量 d_s は、ドレッシングが細かくなるほど

小さくなる。それにもかかわらず、ドレッシングが細かいほど定常研削背分力 P_s が大きいのは、切れ刃状態および切れ刃数の影響である。

この場合、図 14 からわかるように、細かいドレッシングを施すほど、過渡研削時間 t_s は長くなる。

図 15 は、スパークアウト研削時間に及ぼすドレッシング条件の影響を示すものであり、細かいドレッシングを施すほど背分力 P の減少割合が小さくなること、および細かいドレッシングを施すほど定常研削背分力 P_s が大きく、したがって定常状態での研削系のかつぎ量が大ききことより、スパークアウト研削時間 t_f は、細かいドレッシングを施すほど長くなることがわかる。

4. 結 論

研削加工においては、かつぎ現象が存在するために、研削サイクル中には、砥石が工作物と接触した瞬間から過渡、定常およびスパークアウトの三つの異なった研削状態が存在する。

本報告においては、プランジ研削における過渡研削状態、定常研削状態、スパークアウト研削状態での研削抵抗の変化や、過渡研削時間およびスパークアウト研削時間を検討することによって、研削加工条件、すなわち速度比、相対研削速度、研削系の剛性、砥石結合度および

ドレッシング条件が研削の過渡特性に及ぼす影響を解明し、過渡研削時間およびスパークアウト研削時間は、速度比および相対研削速度が大きいほど、研削系の剛性が高いほど、砥石結合度が弱いほど、あらいドレッシングを施すほど、短くなることなどを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) K. Okamura and T. Nakajima: Analysis of Transitional Cutting Process, SME Technical Paper, MR 70-182 (1970).
- 2) 岡村健二郎, 中島利勝: 研削の過渡特性(第1報), 精密機械, **38**, 7 (1972) 580.
- 3) 岡村健二郎, 中島利勝: 過渡的切削現象の解析を基にした研削理論(第1報), 精密機械, **36**, 2 (1970) 141.
- 4) 岡村健二郎, 中島利勝: 過渡的切削現象の解析を基にした研削理論(第2報), 精密機械, **36**, 3 (1970) 167.
- 5) 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), 精密機械, **36**, 4 (1970) 241.
- 6) 岡村健二郎ほか: 砥粒切れ刃による切削現象の研究(第1報), 精密機械, **32**, 4 (1966) 287.
- 7) H. Opitz and K. Gühring: High Speed Grinding, 17th CIRP General Assembly, Ann Arbor, Sept. 1967.
- 8) K. Okamura and T. Nakajima: Elastic Properties of Grinding Wheel, the Memoirs of the Faculty of Engg., Kyoto Univ., Vol. XXXI, Part 4, Oct. 1969.

情 報

(77 ページより続き)

契約上の特色をみると、国産技術の向上に伴って、クロスライセンス契約が 54 件と前年度 26 件を大幅に上回った。これを技術分野別にみると、電気関係が 25 件と全体の半分を占め、化学 12 件、機械 11 件の順になっている。共同研究契約は、5 件ですべて自動車関係である。このうち 4 件は、1970 年 12 月に米国で成立した大気清浄法（マスキー法）による有害排気物の規制値を満たすためのものである。

また、対価の支払条件についてみると、1546 件のうち、有償のものが 1846 件、無償のものが 60 件で、有償契約のうち、イニシャルについては支払うものが 875 件、支払わないものが 611 件、ミニマム条件については、条

件付きが 447 件、付いていないものが 1039 件となっている。

技術導入に伴う対価支払額は、4 億 8800 万ドルで、前年度より 5500 万ドル増加した。

これに対して対価受取額は前年度なみの 6000 万ドル、したがって対価支払額に対する対価受取額の比率は、12.3% と前年度よりも 1.3% 下回った。対価支払額に対する対価受取額の比率は、近年漸増傾向にあるものの、大幅に改善されるまでには至ってはず、米国の 1131%、英国の 110%、フランスの 61%、西独の 40% に比べてはるかに低い。

(服部 敏夫)