研 削 の 過 渡 特 性 (第1報)*

— か つ ぎ 現 象 の 解 明 —

岡村 健二郎** 中 島 利 勝**

Transient Characteristics in Grinding (1st Report)

— Accumulation Phenomenon of Interference Depth of Wheel —

Kenjiro OKAMURA, Toshikatsu NAKAJIMA

In cylindrical plunge grinding where a plunge speed is set so that a depth setting per one revolution of workpiece becomes of the order of 10^{-3} mm, there exists an accumulation phenomenon of interference depth of wheel and the accumulation phenomenon in grinding leads to two transient states, a state of spark-in grinding at the beginning of grinding and a state of spark-out grinding after stop of the infeed of grinding wheel.

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

In this paper the concept of the accumulation phenomenon in grinding is made clear by analyzing the variation of grinding force in spark-in, steady and spark-out states in plunge grinding, and the spark-in and spark-out grinding times. Then it is indicated that the two plunge speed grinding is effective to make the spark-in grinding time shorter.

1. 緒 言

研削加工においては、ある設定量だけ砥石台を送込んでも、砥石軸および工作物支持部の変位や砥石の摩耗があるために、実砥石切込み量は、この設定された砥石台の移動量と異なる。また、砥粒切れ刃は砥石作用面上で弾性的に支持されているし、工作物も弾性体であるから、一つの切れ刃が工作物と接触する過程は過渡的となり、切れ刃の支持剛性および工作物の弾性すなわち接触剛性に起因する切残し量が存在^{1),2)}、したがって工作物が削りとられる量は、一般に実砥石切込み量と異なる。砥石台の送り量と工作物が削りとられる量(寸法減少量)との差で与えられる、この切残し量はつぎの設定砥石台送り量に加わって、研削現象を支配する一つの要因である実砥石切込み量を決定する。すなわち、研削砥石が工作物と接触しはじめた初期の状態(過渡研削状態)においては、工作物が削りとられる量が、設定された砥石台の送り量より小さいために、実砥石切込み量は累積効果により、研削時間とともに増加する。工作物が削りとられる量は、実砥石切込み量が増加するとともに増加し、実砥石切込み量が設定砥石台送り量よりかなり大きくなって、工作物が削りとられる量が設定砥

石台送り量と等しくなると、実砥石切込み量、切残し量、工作物が削りとられる量などが一定となり、定常研削状態になる。これが、研削加工における「かつぎ現象」であり、このようなかつぎ現象が存在するために研削の初期に過渡研削状態が存在し、また砥石台の送込みを停止した後、いわゆるスパークアウト研削状態が存在する。

本研究においては、このかつぎ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、すでに報告した定常状態における研削現象の解析^{1)~3)}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、また研削サイクルタイムを短縮して、研削能率を向上させるために進むべき方向をみいだそうとするものである。本報においては、まずブ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、研削加工におけるかつぎ現象の概念を明らかにし、過渡研削時間を短縮するのに有効な二段変速切込み法によって、かつぎ現象を解明する。

2. ブランジ研削過程

工作物1回転当りの砥石切込み量 A が、コンマ数ミクロンから数ミクロンのオーダーで与えられるように、プラ

*原稿受付 昭和47年2月25日。昭和46年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和46年11月5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)

図1 プランジ研削におけるかつぎ現象

ンジ速度 v_p を選定して進められる円筒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、一つの切れ刃の最大干渉深さ $t_{\max}$ はきわめて小さく、したがってE形干渉が起こり⁴⁾ 切削はされない。しかし砥石は一定のプランジ速度 v_p で進行してくるために、砥石の実干渉深さは次第に大きくなり、したがって切れ刃と工作物との干渉形態は、E形からP形⁴⁾ へさらにC形⁴⁾ へと移行する。すなわち、累積効果によって実際の砥石干渉深さ d_s が、設定砥石切込み深さ Δ に比べて相当大きい値になったとき切削 (C形干渉) が始まり、 Δ に等しいだけの量を切りくずとして排除するようになれば、定常的な研削状態に入る。図1は、プランジ研削過程におけるこのような一連の変化過程、すなわち研削におけるかつぎ現象を模形的に示したものである。図において、 d_0 は砥石摩耗に起因する切残し量、 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 は砥石-工作物系の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をそれぞれ表わし、曲線 $CB B'$ は、工作物半径減を、一点鎖線は曲線 $CB B'$ を工作物が1回転するに要する時間 t_u だけ平行移動したもので、1回転前の工作物半径減を表わす。また、点PおよびCおよびCは切れ刃と工作物との接触形態がE形からP形へ遷移する点をそれぞれ表わし、 t_s は定常研削状態に入るまでの時間、すなわち過渡研削時間を、 t_f はスパークアウト研削時間を表わす。

いま、プランジ速度 v_p で送込まれている砥石が、工作物に接触した瞬間を研削時間の原点とすれば、 $0 \leq t \leq t_p$ においては砥石の切込み深さは非常に小さく、したがって一つの切れ刃の最大干渉深さ $t_{\max}$ はきわめて小さ

いので、切れ刃は工作物と弾性的に接触するのみであり⁵⁾、設定砥石切込み量のすべてが切残し量となるために、実砥石切込み深さすなわち砥石のかつき量 d_s は、研削時間 t とともに増加する。砥石のかつき量 d_s がある値になると ($t=t_p$)、工作物表面には塑性変形によってみぞが生成されるために、仕上面あらさに関する切残し量 d_3 が発生するが、切削作用は存在しないから $t_p \leq t \leq t_p + t_c$ においても、砥石のかつき量 d_s は研削時間とともに増加する。 $t \geq t_p + t_c$ になると、工作物は切りくずとして排除され、工作物の半径が減少しはじめるが、その初期 ($t_p + t_c \leq t \leq t_s$) においては、工作物半径の減少速度が設定砥石切込み量の増加速度 v_p に比べて小さく、したがってこの領域においても、砥石のかつき量 d_s は研削時間とともに増加する。砥石のかつき量 d_s が、工作物1回転当りの設定砥石切込み量 Δ に比べてかなり大きくなって、工作物1回転当りの工作物半径の減少量が Δ に等しくなると ($t=t_s$) すべての切残し量が一定となり、定常研削状態となる。定常研削状態において砥石の送りを停止すると、砥石のかつき量 d_s と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 との和で与えられる研削系のかつき量 ($d_s + d_1$) が存在するために、いわゆるスパークアウト研削状態となり、研削系のかつき量は研削時間とともに減少する。しかし、研削系のかつき量 ($d_s + d_1$) は、スパークアウト研削を長くやっても零とはならず、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 (限界研削系のかつき量) に収斂する。

この研削におけるかつぎ現象は、研削抵抗と密接な関係を有する。すなわち、過渡研削状態においては、砥石のかつき量が研削時間とともに増加し、したがって研削抵抗も研削時間とともに増加するが、定常研削状態になって砥石のかつき量 d_s が研削時間に対して一定になると、研削抵抗も一定となる。スパークアウト研削状態になると、砥石のかつき量が研削時間とともに減少するために研削抵抗も減少するが、限界かつき量が存在するために、長くスパークアウト研削を行っても研削抵抗は零とはならない。

従来の研削現象の解析では、過渡状態はあまり認識されず、砥石が工作物と接触した瞬間から定常状態にあるものとして論議しており、その場合の砥石と工作物との相互干渉深さは Δ であると考えられてきた。したがって、研削におけるかつぎ現象認識の必要性は、かつき比 d_s/Δ の値によって決まってくる。プランジ研削におけるかつき比を理論と実験の両面から求めた結果⁶⁾ によれば、 $d_s/\Delta = 2 \sim 5$ とかなり大きく、したがって研削現象

の解析にあたっては、上にのべたかつぎ現象を考慮することが必要である。

3. かつぎ現象の実験的考察

3.1 方法および装置

研削におけるかつぎ現象は、すでにのべたように研削抵抗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かつぎ現象を実験的に検討した。図2は、実験装置の概観を示す。本実験においては、砥石速度 V_s を一定とし、工作物速度 V_w および工作物1回転当りの設定砥石切込み量 Δ を、 $V_w=28\sim145$ m/min および $\Delta=0.1\sim15$ μ /rev. of W.P. の範囲で変化させた。工作物1回転当りの砥石切込み量 Δ 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。図3は本実験で用いた円筒研削盤の研削中における剛性を、砥石軸および工作物軸について測定した結果であり、研削抵抗の背分力 P に対して、砥石軸の変位 y_s および工作物軸の変位 y_w をプロットしたものである。これより、背分力 P と砥石軸および工作物軸の変位とは直線関係に

図2 実験装置

図3 砥石軸および工作物軸の剛性

あり、砥石軸の剛性は $k_s=3000$ kg/mm、工作物軸の剛性は $k_w=880$ kg/mm であり、したがって研削系の剛性 $k_{s,y}=680$ kg/mm である。本実験の場合、工作物軸の剛性が一般の研削におけるそれよりもかなり低いのは、研削抵抗を測定するために工作物支持部を弱くしてあるためである。その他の研削条件は、つぎのようである。

研削砥石: WA 60 LV, 300 mm ϕ ×38 mm

工作物: S 45 C, 120 mm ϕ ×30 mm

砥石速度: $V_s=1744$ m/min

速度比: $K_v=V_w/V_s=0.0162\sim0.0830$

研削幅: $B=30$ mm

ドレッシング条件: 切込み深さ 20 μ , 送り速度 0.2 mm/rev. of G. W.

研削液: シムクール

3.2 実験結果とその検討

図4は、速度比を $K_v=0.0467$ として、工作物1回転当りの設定砥石切込み深さ Δ を変化させたプランジ研削における過渡研削状態での研削背分力 P の研削時間に対する変化状態を示す。図よりわかるように、研削背分力 P は、砥石と工作物とが接触した瞬間を原点としてはかった研削時間 t 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。

研削抵抗は、砥石と工作物との干渉深さが大きくなるほど増大することから判断して、上記のことは過渡研削状態におけるかつぎ現象すなわち実砥石切込み深さの累積効果を意味し、また定常研削状態においては、砥石切込み量と切りくず排除による工作物半径の減少量とが平衡するために、砥石のかつぎ量が一定となることを示している。さらに、設定砥石切込み量 Δ 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の研削時間すなわち過渡研削時間は短

図4 研削背分力と研削時間との関係

図5 過渡研削状態における背分力の変化

図6 定常研削背分力

い、このことは、 Δ が大きいほど、過渡研削状態における砥石かつぎ量の増加速度および定常状態における砥石かつぎ量が大きいことを意味する。

図5は、研削時間 t を過渡研削時間 t_s で割ることにより無次元化し、また研削背分力 P を定常研削状態における背分力 P_s で割って無次元化した場合の過渡研削状態における研削背分力の変化を示すものである。この図よりわかるように、無次元化背分力は設定砥石切込み量 Δ に関係なく一つの曲線で表わされる。このことは、過渡研削時間 t_s および定常研削状態における背分力 P_s がわかれば、工作物1回転当りの設定砥石切込み量 Δ がどのような値であっても、過渡研削状態での研削背分力の変化が一次的に決定されることを示している。

図6は、工作物と砥石との速度比 $K_v = 0.0162$ とした場合のプランジ研削における定常研削背分力 P_s と工作物1回転当りの設定砥石切込み量 Δ との関係を示すものである。図よりわかるように、工作物1回転当りの設定

砥石切込み量 Δ が大きいほど、定常研削背分力 P_s は大きくなるが、このことは設定砥石切込み量 Δ が大きいほど定常研削状態における砥石かつぎ量 d_s が大きいことを意味する。すなわち、定常研削状態における砥石かつぎ量 d_s は、図1より明らかなように、

$$d_s = \Delta + d_2 + d_3$$

で与えられるが、設定砥石切込み量 Δ が大きくなると、仕上面あらさがあらかなり²⁾、したがって仕上面あらさに関する切残し量 d_3 が大きくなるとともに、接触剛性に起因する切残し量 d_2 も Δ が大きいほど大きくなる²⁾ ために、上式で与えられる定常研削状態での砥石かつぎ量 d_s は、設定砥石切込み量 Δ が大きいほど大きくなる。

定常研削状態において砥石台の送りを停止すると、かつぎ現象が存在するために、すでにのべたようにスパークアウト研削状態となり、研削系のかつぎ量 $(d_s + d_1)$ は、スパークアウト研削時間とともに減少し、したがって砥石のかつぎ量も、限界かつぎ量まで減少するために研削背分力は減少し、限界かつぎ量に関係した一定値に近づく。図7は、速度比 $K_v = 0.0162$ の場合のスパークアウト研削状態における研削背分力 P の研削時間に対する変化を示す。図よりわかるように、設定砥石切込み量 Δ が異なっても、研削背分力 P は研削時間とともに同一曲線に沿って減少する。すなわち、 $\Delta = 14.7 \mu/\text{rev. of W.P.}$ の場合、背分力 P は $\Delta = 14.7$ に対する定常研削背分力を与える点 P_1 から、 $P-t$ 曲線 P_1P_3O に沿って減少し、また $\Delta = 3 \mu/\text{rev. of W.P.}$ の場合は、 $\Delta = 3$ に対する定常研削背分力を与える点 P_2 から同じ $P-t$ 曲線 P_2O に沿って減少する。このことは、スパークアウト研削が研削系のかつぎ量 $(d_1 + d_s)$ の減少、すなわち砥石軸および工作物軸の変位の減少と砥石かつぎ量の減少とによって進行することから容易に理解される。また、図

図7 スパークアウト研削状態における背分力の変化

図 8 過渡研削時間とスパークアウト研削時間

7 には工作物 1 回転当りの設定砥石切込み量 Δ と定常研削背分力 P_s 力との関係を与える $P_s-\Delta$ 曲線が図示されている。これら $P_s-\Delta$ 曲線と $P-t$ 曲線とより、任意の設定砥石切込み量 Δ に対するスパークアウト研削時間 t_f を図的に求めることができる。すなわち、工作物 1 回転当りの設定砥石切込み量 $\Delta=14.7 \mu/\text{rev. of W.P.}$ の場合、 $\Delta=14.7$ から縦軸に平行な直線をひくと、それが $P_s-\Delta$ 曲線と交わる点 P_{s1} は、 $\Delta=14.7 \mu/\text{rev. of W.P.}$ の場合の定常研削背分力を与える。 P_{s1} 点から横軸に平行な直線をひき、それが $P-t$ 曲線と交わる点を P_1 とすると、点 P_1 を与える時間 $t_f=32.9 \text{ sec}$ が、 $\Delta=14.7 \mu/\text{rev. of W.P.}$ でプランジ研削をする場合のスパークアウト時間 t_f を与えることになる。

なお、本実験においては、砥石を工作物から完全に離れた時の研削抵抗の変化から、限界かつぎ量の存在は確認できたが、限界かつぎ量に関する限界力 P_c は、 $P_c=0.01 \text{ kg/mm}$ のオーダーであり、動力計の感度の関係上正確に決定することはできなかった。

図 8 は、速度比 $K_v=0.0162$ でプランジ研削した場合の設定砥石切込み量 Δ と過渡研削時間 t_s およびスパークアウト研削時間 t_f との関係を示す。すでにのべたように、設定砥石切込み量 Δ が大きいほど定常研削状態における研削系のかつぎ量、すなわち砥石のかつぎ量と砥石軸および工作物軸の変位とが大きく、したがって定常研削背分力 P_s は大きくなるにもかかわらず、この図からわかるように過渡研削時間 t_s は、設定砥石切込み量 Δ が大きいほど短くなり、はやく定常状態に入る。一方、スパークアウト研削時間 t_f は、設定砥石切込み量

Δ が大きいほど若干長くなる。このことは、スパークアウト研削開始と同時に、研削背分力 P は同一曲線に沿って減少するが、スパークアウト研削開始点での背分力すなわち定常研削背分力 P_s が、設定砥石切込み量 Δ が大きいほど大きいことより理解できる。

いま、設定砥石切込み量 Δ が増加することによる過渡研削時間 t_s の減少と、スパークアウト研削時間 t_f の増加とを比較すると、前者のほうが大きく、したがって、 (t_s+t_f) は、設定砥石切込み量 Δ が大きいほど小さくなるから、研削サイクルタイムを短くする観点からは Δ が大きいほどよい。

4. 二段变速切込み研削法

定常状態における工作物 1 回転当りの切削量 Δ が、仕上表面特性、仕上精度などの点から与えられ、それに相当するプランジ速度 v_p が決まった時、過渡研削時間 t_s を短縮して能率的研削加工を行なう方法として、プランジ速度の二段切換法が考えられる。すなわち、工作物がある量 Δ だけ研削するためには、すでにのべたように砥石は、その数倍の量 d_s をかつがなければならないから、第一段ではできるだけ速いプランジ速度 (v_{p1}, Δ_1) で砥石を送込み、砥石が工作物と接触しはじめてから、できるだけ早い時間で砥石のかつぎ量 d_s を目標とする切削量 Δ に対応した値にし、そこでプランジ速度を切換えて、仕上結果の要求に対応したプランジ速度 (v_{p2}, Δ_2) にする方法である。

図 9 は、二段变速切込み研削法におけるプランジ速度切換点と過渡研削時間との関係を、砥石台の移動距離 d と研削背分力 P の変化曲線によって示したものである。図において、曲線 OA_2B_2 は、砥石切込み速度 $\Delta_2=1.8 \mu/\text{rev. of W.P.}$ の場合、曲線 OA_1B_1 は砥石切込み速度 $\Delta_2=1.8 \mu/\text{rev. of W.P.}$ の場合、曲線 OA_1B_2 は砥石切込み速度 $\Delta_1=8.7 \mu/\text{rev. of W.P.}$ の場合の研削背分力の変化を表わし、それぞれ A_2 点および A_1 点で定常研削状態となる。いま、最初砥石切込み速度 Δ_1 で研削を行ない、砥石と工作物とが接触しはじめてから、ある時間後に砥石切込み速度を Δ_2 に変換すると、その变速時期によって研削抵抗曲線は変化する。すなわち、 Δ_1 から Δ_2 への変速時期が遅すぎると、变速時の砥石のかつぎ量が砥石切込み速度 Δ_2 で研削する場合の定常砥石かつぎ量 $(d_s)_{\Delta_2}$ より大きいために、变速後砥石のかつぎ量が $(d_s)_{\Delta_2}$ まで減少し、この場合は曲線 OGG_1B_2 のような研削抵抗曲線が得られる。一方、 Δ_1 から Δ_2 への変速時期が早すぎると、变速時の砥石かつぎ量が砥石切込み速度 Δ_2 で研削する場合の定常かつぎ量 $(d_s)_{\Delta_2}$ より小さく、

図9 二段変速切込み研削における
背分力の変化

図10 二段変速切込み研削における変
速時期と過渡研削時間との関係

図11 二段変速切込み研削における
過渡研削時間

したがって変速後、砥石かつぎ量が $(d_s)_{J_2}$ まで増加してはじめて定常研削状態となり、この場合は曲線 ODD_1B_2 のような研削抵抗曲線が得られる。 d_1 から d_2 への変速時期を、砥石かつぎ量が $(d_s)_{J_2}$ に等しくなった時に選ぶと、砥石切込み速度を変換すると同時に定常研削状態が得られ、この場合は曲線 OCB_2 のような研削抵抗曲線がえられる。

図10は、変速時期と過渡研削時間との関係を示す。図においては、変速時の研削背分力 P を、切込み速度 d_2 で研削した場合の定常背分力 $(P_s)_{J_2}$ で割った値で変速時期を表わし、それに対して二段変速切込み研削を行なった場合の過渡研削時間 t_s が、最初から切込み速度 d_2 で研削した場合の過渡研削時間 $(t_s)_{J_2}$ に比べてどれくらい大きくなるかを示している。この図よりわかるように、第一の砥石切込み速度 d_1 における砥石のかつき量または背分力が、第二の砥石切込み速度 d_2 における定常かつぎ量または定常背分力に等しくなったところで、 d_1 から d_2 へ砥石切込み速度を変換すると、過渡研削時間は最小となり、その値は最初から d_2 で研削する場合の過渡研削時間に比べてかなり小さい。

図11は、うえにのべたような最適時期に、 d_1 から d_2 への変速を行なった場合の過渡研削時間 t_s を、 d_2 に対して d_1 をパラメータとして示すものである。図よりわかるように、仕上結果の点から d_2 が決まったとき、最初の砥石切込み速度 d_1 を大きくするほど、過渡研削時間は短くなる。

また、スパークアウト研削の開始と同時に、定常研削状態における砥石かつぎ量を、ある量だけ減少さすこと

によって、スパークアウト研削時間の短縮も可能となる。

5. 結 論

研削加工においては、かつぎ現象が存在するために、研削現象を支配する一つの要因である実砥石切込み深さは、設定した砥石切込み深さとかなり異なる。したがって、研削加工におけるかつぎ現象の認識は、研削現象を本質的に理解するうえできわめて重要である。

本報告においては、かつぎ現象に起因する過渡研削状態およびスパークアウト研削状態における研削背分力を検討することによって、研削加工におけるかつぎ現象の概念を明らかにした。また、過渡研削時間およびスパークアウト研削時間を検討し、それらを減少さすことにより能率的研削加工を行なう方法として、二段変速切込み研削法を提案し、そこで過渡研削時間が短縮される根拠を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 岡村・中島: 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.
- 2) 岡村・中島・渡辺: 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.
- 3) 岡村・中島: 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.
- 4) K. Okamura and T. Nakajima: Analysis of Transitional Cutting Process, SME Technical Paper, MR 70-182 (1970).
- 5) 岡村・中島・山本: 砥粒切れ刃による切削現象の研究 (第5報), 精密機械, 33, 4 (1967) 237.
- 6) K. Okamura and T. Nakajima: Fundamental Analysis of Grinding Process, SME Technical Paper, MR 70-183 (1970).