研削加工の最適化に関する基礎的研究 (第1報)*

—砥石台切込み速度を直線的に制御した場合の研削過程—

中 島 利 勝** 露 峯 登***

Approach to Optimization of Plunge Grinding Operation (1st Report)

—Grinding Process with Linearly Controlled Infeed Rate of Wheel Head—

Toshikatsu NAKAJIMA, Noboru TSUYUMINE

In traditional plunge grinding, a constant infeed rate of wheel head is selected and grinding efficiency may in general become lower with better grinding quality. In this paper proposed is a new plunge grinding technique, in which the infeed rate of wheel head is linearly controlled with grinding time, for increasing grinding efficiency without detriment to grinding quality. In the new process the accumulated amount in grinding system decreases in the latter stage of wheel head infeed and then the grinding efficiency can be increased with a required quality and a given grinding allowance. Under a certain condition the new process becomes more advantageous in both efficiency and quality than traditional one.

1. 緒 言

一般のプランジ研削では砥石台の切込み速度は一定にとられる。この場合、砥石切込み量と工作物除去量とは異なるために切残し量が存在し、それは研削の初期段階において累積されるから、研削加工は設定砥石切込み量よりもかなり大きい実砥石切込み量の下で進行する¹⁾。一方、研削精度、仕上面粗さ、表面特性などの加工品質は実砥石切込み量と密接な関係を有しそれが小さい程良好となるから^{2)~6)}、加工品質を所定の値にするためには、砥石台切込み区間で研削サイクルを終えるわけにはいかず、研削の初期段階で累積された切残し量を解放させることによって実砥石切込み量を減少させること、すなわちスパークアウト研削が必要となり、その分だけ研削サイクルタイムを長くしなければならないから研削能率が低下する。逆に、砥石台切込み区間で研削サイクルを終え、かつ所定の加工品質を得るためには、砥石台切込み速度をかなり小さく設定することが必要となり、この場合にも研削能率の低下は避けることができない。このように研削能率と加工品質とは相反する特性を有し、一方を向上すれば他方が犠牲になるのが普通である。本研究においては、砥石台切込み速度を制御することによって、研削加工を能率および品質の観点より最適化するための手法を確立しようとするものである。本報告において

は、従来のプランジ研削におけるように一定速度で砥石台を切込むのではなく、砥石台切込み速度を研削時間に関して直線的に制御した場合の研削過程を検討することによって、加工品質を劣化させることなく研削能率を増大させるための最適砥石台切込み曲線を決定する基礎を明らかにする。

2. 実験方法

研削実験は、砥石台切込み速度のみを制御し他のすべての研削条件を一定にして円筒プランジ研削方式で行い、砥石台移動量、寸法生成量、研削抵抗および砥石消耗量を測定することによって、砥石台切込み速度を制御した場合の研削過程を実験的に解析した。砥石台切込み速度を制御するにあたっては、プランジ速度調整弁の開閉をカムで制御し、図1に示すように砥石台切込み速度 $\dot{d}(t)$ が研削時間 t に対して直線的に変化するようにした。すなわち、

図1 砥石台切込み速度の制御

* 原稿受付 昭和53年4月20日。昭和53年度精機学会春季大会学術講演会(昭和53年4月2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 三菱自動車工業(株)(岡崎市橋目町字中新切1)

$$\left. \begin{aligned} \dot{d}(t) &= v_{pi} + \beta \cdot t & (0 \leq t \leq \tau_c) \\ &= v_{p0} - \alpha(t - \tau_c) & (\tau_c \leq t \leq \tau_i) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 v_{pi} は砥石と工作物とが接触しはじめた時の砥石台切込み速度、 β は加速度、 α は減速度、 τ_c は加速から減速への切換え時期、 v_{p0} は $t = \tau_c$ における最大砥石台切込み速度、 τ_i は砥石台切込み時間である。砥石台移動量は電気マイクロメータにより、寸法生成量は容量型微小変位計で、研削抵抗は工作物軸支持センタに貼り付けたストレンゲージによって、それぞれ測定した。また、砥石摩耗量はプラスチック板に砥石作用面を転写し、それを触針式表面検査機で測定することによって決定した。研削条件は次のようである。

研削方式：円筒プランジ研削

研削砥石：WA 80 L 9 V ($\phi 400 \times 50$ mm)

工作物：SCM 3 ($H_V = 325$ kg/mm², $\phi 120 \times 30$ mm)

砥石周速度： $V_s = 45$ m/s

速度比： $K_V = V_w/V_s = 0.014$

半径比： $K_R = R_w/R_s = 0.3$

研削系剛性： $k_{sy} = 1.080$ kg/ μ m

研削幅： $B = 30$ mm

研削液：ソリュブル型

ドレッシング条件：切込み $20 \mu\text{m} \times$ 送り 0.2 mm/rev
of G. W.

3. 砥石台切込み速度が直線的に増減する場合

砥石台切込み速度が、まずある初速度より加速されて研削時間と共に直線的に増加し、次いで減速されて研削時間と共にゼロまで直線的に減少する場合の研削過程を解析する。

3.1 研削過程

図2は、砥石台切込み速度 $\dot{d}(t)$ を上述のように制御した場合の砥石台移動量 $d(t)$ および寸法生成量 $R(t)$ の研削時間 t に対する変化過程を示す。 $d(t)$ を与える砥石台切込み曲線OCIは、 $t = \tau_c$ において勾配が一致する二つの2次曲線より構成され、 $t = 0$ におけるその勾配は v_{pi} に等しい。また総砥石台移動量 $d_T = d(\tau_i)$ および τ_i は、 v_{pi} 、 β 、 α および τ_c によって一義的に決定される。寸法生成は、砥石と工作物とが接触しはじめる点Oより t_e 時間だけ遅れた点Eより発生しはじめ、 t と共に点Fまで増加していくが、寸法生成曲線EMI/Fは点C($t = \tau_c$)とは異なる点M($t = t_M$)において変曲点を有する。

図3は、 $\dot{d}(t)$ と砥石摩耗速度 $\dot{d}_0(t)$ との差で与えられる有効砥石台切込み速度 $\dot{d}'(t)$ および寸法生成速度 $\dot{R}(t)$ の t に対する変化過程を示す。本実験においては、ドレッシング後一定量を研削することによって初期摩耗を除

図2 砥石台移動量と寸法生成量の変化過程

図3 有効砥石台切込み速度と寸法生成速度の変化過程

去した砥石を用いており、このような砥石の摩耗速度は砥石台切込み速度に比例し¹⁾、 $\mu = \dot{d}_0(t)/\dot{d}(t) = 0.004$ で与えられるから、 $\dot{d}'(t)$ は次式で与えられる。

$$\dot{d}'(t) = (1 - \mu)\dot{d}(t) \quad (2)$$

$\dot{R}(t)$ は、砥石と工作物との接触開始点Oより t_e 時間遅れた点Eより t と共に増加し、それが $\dot{d}'(t)$ に等しくなる点M($t = t_M$)において最大値をとり、以後 t と共に減少し、 $\dot{d}'(t) = 0$ となる点($t = \tau_i$)より t_f 時間スパークアウト研削を行った時 $\dot{R}(t) = 0$ となる(スパークアウト研削においては、砥石摩耗は非常に小さいので、 $\dot{d}_0(t) = 0$ と考えている)。この場合、 $t \leq t_M$ においては $\dot{R}(t) \leq \dot{d}'(t)$ であり、 $t \geq t_M$ においては $\dot{R}(t) \geq \dot{d}'(t)$ である。

図4は、切残量 $d_r(t)$ 、研削背分力 $P(t)$ および研削系かつぎ量 $d_g(t)$ の t に対する変化過程を示す。これらはいずれも、砥石と工作物との接触開始点より研削時間と共に増加し、 $t = t_M$ において最大となり、以後は研削

図4 切残し量, 研削背分力および研削系かつぎ量の変化過程

時間と共に減少し, $d_r'(t)=0$ となる点から t_f 時間スパークアウト研削を行った時それぞれの限界値¹⁾に等しくなる。

これらの図よりわかるように, 砥石台切込み速度を研削時間に対して直線的に制御した場合のプランジ研削過程は次のようである。研削の初期段階 ($t < t_M$) においては, 寸法生成量および寸法生成速度は研削時間と共に増加するが, 有効砥石台切込み速度に比べて寸法生成速度が小さいために, そこでは研削時間と共に切残し量が累積されて増加し, その結果背分力および研削系かつぎ量も増加する。研削時間が増加して, 研削時間と共に増加する寸法生成速度が有効砥石台切込み速度に等しくなる点 ($t=t_M$) を過ぎると, 研削時間と共に寸法生成速度は減少しはじめるが, この区間においては寸法生成速度が有効砥石台切込み速度よりも大きく, 従って研削の初期段階で累積された研削系かつぎ量の解放が行われ, $d_r(t)$, $d_g(t)$, $P(t)$ は研削時間と共に減少する。従って, $\dot{R}(t)$, $d_r(t)$, $d_g(t)$, $P(t)$ は寸法生成速度が有効砥石台切込み速度に等しくなる点 ($t=t_M$) において最大となる。この場合, 砥石台切込み速度がゼロとなる点 ($t=\tau_i$) においてもすべての研削系かつぎ量は解放されてはおらず, 解放可能な研削系かつぎ量のすべてを解放するためには, さらに t_f 時間のスパークアウト研削を続けなければならない。しかし, 上に述べたように, 砥石台切込み区間に研削系かつぎ量を解放する過程が含まれており, 従ってスパークアウト開始時のかつぎ量が小さいので, t_f は従来の場合に比べて一般に短くなる。

図5, 図6および図7は, 最大寸法生成速度 $\dot{R}(t_M)$, スパークアウト研削開始点における寸法生成速度 $\dot{R}(\tau_i)$ および t_f に及ぼす τ_c , β および α の影響をそれぞれ示

図5 寸法生成速度に及ぼす加速から減速への切換時期の影響

図6 寸法生成速度に及ぼす加速度の影響

図7 寸法生成速度に及ぼす減速の影響

す。これらの図よりわかるように, $\dot{R}(t_M)$ は, τ_c および β によって著しく影響され, それらが大きい程大きくな

図8 背分力および切残量と寸法生成速度との関係

る。また $\dot{R}(t_M)$ は α によってはあまり影響されない。一方、 $\dot{R}(\tau_i)$ および t_f は、 τ_c および β によっては全く影響されず、 α が大きい程大きくなる。

図8は、 $t=t_M$ 、 $t=\tau_i$ における背分力 $P(t_M)$ 、 $P(\tau_i)$ および切残量 $d_r(t_M)$ 、 $d_r(\tau_i)$ とそれぞれの点における寸法生成速度 $\dot{R}(t_M)$ 、 $\dot{R}(\tau_i)$ との関係を示す。図よりわかるように $P(t_M)$ と $\dot{R}(t_M)$ および $P(\tau_i)$ と $\dot{R}(\tau_i)$ との関係は同一直線で与えられ、これは砥石台切込み速度 v_p を一定とする従来のプランジ研削における定常研削背分力 $P(t_s)$ と有効プランジ速度 v_p' との関係¹⁾ と一致する。また、 $d_r(t_M)$ と $\dot{R}(t_M)$ および $d_r(\tau_i)$ と $\dot{R}(\tau_i)$ との関係も同一曲線で与えられ、これも従来のプランジ研削における定常切残量 $d_r(t_s)$ と v_p' との関係と同一である。

3.2 研削加工代および加工品質が与えられた場合の研削能率

研削加工品質は、研削系かつぎ量と密接な関係を有し、それが小さい程良好となる。そこで加工品質を研削終了点における研削系かつぎ量 d_g によって表し、研削加工代および加工品質が与えられた場合の研削能率について考察する。

図9は、研削加工代を決める総砥石台移動量 $d_T=100 \mu\text{m}$ および所定の加工品質を得るための最終研削系かつぎ量 $d_g=4.3 \mu\text{m}$ が与えられた場合について、 α が一定で v_{p0} が変化するように $\dot{d}(t)$ を t に対して直線的に制

図9 研削能率に及ぼす最大砥石台切込み速度の影響

御した場合の研削能率すなわち平均寸法生成速度 $\bar{R}$ と v_{p0} との関係を示す。図よりわかるように、 α が一定の場合には、 v_{p0} が大きい程 $\bar{R}$ は大きくなり、従って $\tau_c=0$ すなわち $\dot{d}(t)$ が研削時間に対してある速度より直線的に減少するように制御された場合に研削能率は最大となる。このことは、 α が一定の場合、 $\dot{d}(t)=0$ となる点 ($t=\tau_i$) における研削系かつぎ量 $d_g(\tau_i)$ は v_{p0} が変化しても一定であり、従って研削系かつぎ量を $d_g(\tau_i)$ から d_g まで減少させるために行わなければならないスパークアウト研削時間 τ_f は v_{p0} に関して一定であるから、 τ_i が短い程総研削時間は短くなることより理解されう。

図10は、 $d_T=90 \mu\text{m}$ および $d_g=3.2 \mu\text{m}$ が与えられた場合について、 v_{p0} が一定で α が変化するように $\dot{d}(t)$ を t に対して直線的に制御した場合の $\bar{R}$ と α との関係を示す。図よりわかるように、 v_{p0} が一定の場合、 α が小さい程 $\bar{R}$ は大きくなり、従ってこの場合にも、 $\tau_c=0$ すなわち $\dot{d}(t)$ が研削時間に対してある速度より直線的に減少するように制御されたとき研削能率は最大となる。これは、 v_{p0} が一定の場合、 α が変化しても τ_i は一定であるが、 $d_g(\tau_i)$ は α が大きい程大きく、従って研削系かつぎ量を $d_g(\tau_i)$ から d_g まで減少させるために必要な τ_f は α が大きい程長くなり、その結果として総研削時間は α が大きい程長くなるためである。

図10 研削能率に及ぼす減速度の影響

4. 砥石台切込み速度が直線的に減少する場合

研削加工代および加工品質を一定とした場合の研削能率は、すでに述べたように、砥石台切込み速度がある最大速度から研削時間と共に直線的に減少するように制御された場合に増大する。そこで砥石台切込み速度がそのように制御された場合の研削過程を検討し、最大速度および減速度が研削能率にどのように影響するかを考察する。

4.1 研削過程

$\dot{d}(t)$ が最大速度 v_{p0} から t と共に直線的に減少(減速度 α) するように制御された場合の t に対する、 $d(t)$ および $R(t)$ の変化過程を図11に、 $\dot{d}'(t)$ および $\dot{R}(t)$ の変化過程を図12に、 $d_r(t)$, $P(t)$ および $d_g(t)$ の変化過程を図13に、それぞれ示す。これらの図と図2、図3および図4とを比較することによってわかるように、砥石台切込み速度が研削時間に対してまず加速されて直線的に増加し、次いで減速されて直線的に減少する場合の研削過程と、砥石台切込み速度がある最大速度から研削時間と共に直線的に減少する場合の研削過程とは本質的に同じである。

図14および図15は、 $\dot{R}(t_M)$, $\dot{R}(\tau_i)$ および t_f に及ぼす v_{p0} および α の影響を示す。これらの図よりわかるように、 $\dot{R}(t_M)$ は、 v_{p0} が大きい程大きく、また α が大きくなるとわずかに減少する。また $\dot{R}(\tau_i)$ および t_f は、

図11 砥石台移動量と寸法生成量

図12 有効砥石台移動量と寸法生成速度

図13 切残し量, 研削背分力および研削系かつぎ量

v_{p0} によっては影響されず α が大きい程大きくなる。さらに、 $t = t_M$ および $t = \tau_i$ における寸法生成速度と背分力および切残し量との関係は、図8に示すそれぞれの関係と一致する。

4.2 研削能率

研削加工代および加工品質が与えられた場合の研削能

図14 最大寸法生成速度とスパークアウト研削開始点の寸法生成速度 (v_{p0} の影響)

図15 最大寸法生成速度とスパークアウト研削開始点の寸法生成速度 (α の影響)

率は、すでに述べたように、 v_{p0} が大きい程、また α が小さい程増大する。しかし砥石台切込み速度をある最大速度 v_{p0} から研削時間と共に直線的に減速度 α で減少するように制御する場合、研削加工代が与えられれば、 v_{p0} を大きくする程 α を大きくしなければならず、それぞれの研削能率に及ぼす影響が相殺されることになる。そこで v_{p0} と α のいずれが研削能率により強い影響をもつかを検討する。

図16は、 $d_T = 50 \mu\text{m}$ および $d_g = 3.4 \mu\text{m}$ が与えられた場合について、 v_{p0} を変化し、それに対応して $d_T = 50 \mu\text{m}$ となるように決定した α で $\dot{d}(t)$ を直線的に減少させた場合の平均寸法生成速度 $\bar{R}$ および $d_g = 3.4 \mu\text{m}$ とするために必要なスパークアウト研削時間 τ_f と v_{p0} との関係を示す。図よりわかるように、研削加工代が一定の場合には v_{p0} を大きくする程 α も大きくなるが、 v_{p0} の方

図16 研削能率

が α よりも研削能率に及ぼす影響が大きいく、従って、 v_{p0} を大きくする程研削加工代および加工品質が与えられた場合の研削能率は大きくなる。これは、 v_{p0} が大きい程 α が大きく τ_i が短くなるのに対して、 α が大きい程 $d_g(\tau_i)$ が大きく、それを d_g まで減少するために必要なスパークアウト研削時間 τ_f は長くなるが、それらの和で与えられる総研削時間は v_{p0} が大きい程短くなるためである。

4.3 従来のプランジ研削との比較

砥石台切込み速度を研削時間に対して直線的に制御する場合には、研石台切込み区間に研削系かつぎ量を解放する過程が含まれており、従って砥石台切込み速度を一定にする従来のプランジ研削過程とは本質的に異なる。

図17は、 $\dot{d}(t) = v_{p0} - \alpha \cdot t$ の場合、従来のプランジ研削において $v_p = \dot{d}(t)$ とした場合および $v_p = \dot{d}(t_M)$ とした場合の $d(t)$ と $R(t)$ の変化過程を示す。いずれの場合も砥石摩耗速度と砥石台切込み速度との比すなわち砥石摩耗速度係数 μ は 0.004 であり、スパークアウト研削開始点 I または Y における砥石摩耗量は等しい。またスパークアウト区間における寸法生成曲線は研削系かつぎ量が等しくなった時以降はいずれの場合も同一である。図

図 17 従来のプランジ研削過程との比較

よりわかるように、 $v_p = \bar{d}(t)$ の場合、スパークアウト研削開始点における研削系かつぎ量は $\bar{d}(t)$ を変化させる場合のそれよりも大きく、従って研削加工代および加工品質を与えた場合の総研削時間は長くなる。また、 $v_p = \bar{d}(t_M)$ の場合、スパークアウト研削開始点での研削系かつぎ量は $\bar{d}(t)$ を変化させる場合のそれより大きい。点 I' でそれぞれの場合の研削系かつぎ量は等しくなり、それ以後は同一曲線に沿って研削系かつぎ量は減少するから、研削加工代および加工品質が与えられた場合の総研削時間は等しくなる。これらのことより、研削加工代および加工品質が与えられた場合、砥石台切込み速度を一定とする従来のプランジ研削において、 $0 < v_p < \bar{d}(t_M)$ の範囲でプランジ速度 v_p が設定された時には、砥石台切込み速度を $\bar{d}(t) = v_{p0} - \alpha \cdot t$ と制御した研削における方が従来の方法よりも高能率である。

5. 結 論

従来のプランジ研削におけるように一定速度で砥石台

を切込むのではなく、砥石台切込み速度を研削時間に対して直線的に制御した場合の研削過程を検討することによって、加工品質を劣化させることなく研削能率を増大させるための最適砥石台切込み曲線を決定する基礎を明らかにした。主な結論は次のようである。

- (1) 砥石台切込み速度が研削時間に対して直線的に変化する場合には、砥石台切込み区間に研削系かつぎ量を解放する過程が含まれる。
- (2) 研削加工代および加工品質を一定とした場合には、砥石台切込み速度をある最大速度からある減速度で研削時間と共に直線的に減少させるように制御した場合に研削能率は最大となる。この場合、最大速度が大きい程、減速度が小さい程研削能率は増大するが、研削加工代が一定であることによって最大速度と減速度との設定しうる範囲が存在する場合には、減速度を小さくするよりも最大速度を大きくする方が研削能率は増大する。
- (3) 砥石台切込み速度を制御した研削の方が、従来のプランジ研削に比べて、研削能率、加工品質の点で有利になる条件が存在する。

参 考 文 献

- 1) 中島利勝：プランジ研削過程の研究（第1報），精密機械，**41**，11（1975）1066。
- 2) 岡村健二郎，中島利勝：研削の過渡特性（第2報），精密機械，**39**，1（1973）106。
- 3) 中島利勝，岡村健二郎，木下輝一：研削の過渡特性（第3報），精密機械，**40**，3（1974）256。
- 4) 岡村健二郎，中島利勝：研削の過渡特性（第4報），精密機械，**40**，10（1974）886。
- 5) 岡村健二郎，中島利勝，井上陽一，宇野義幸：過渡的切削過程における表面特性の研究（第2報），精密機械，**39**，8（1973）794。
- 6) 岡村健二郎，中島利勝，宇野義幸，梶田英夫：過渡的切削過程における表面特性の研究（第3報），精密機械，**43**，7（1977）814。