砥石の交番切込みに対する砥石面性状の応答性*

—高能率精密円筒プランジ研削の適応制御の研究(第3報)—

須 藤 徹 也** 佐 田 登 志 夫***

Response of Wheel Surface Condition in Alternate Infeed Grinding

—Research on Adaptive Control of High Efficiency
Cylindrical Plunge Grinding (3rd Report)—

Tetsuya SUTO, Toshio SATA

A simplified experiment of wheel infeed cycle has been carried out to investigate the behaviours of the working surface of a grinding wheel and their relations to the grinding power and the roughness of the ground workpiece. The wheel depth of cut was changed alternately for every workpiece from a rough grinding infeed to a finish grinding infeed. As the wheel surface becomes coarser in rough grinding and smoother in finish grinding of an alternate infeed cycle, the grinding power and the surface roughness deviate characteristically from those of the constant infeed grinding depending on the wheel depth of cut and its duration time. The dependence of the grinding power and surface roughness upon the worn area of active grains is clarified experimentally. The grinding power increases linearly with the increase of the worn area of the active grains, on the contrary, the surface roughness decreases linearly with the increase of the logarithms of the worn area. The study gives an important base to estimate the wheel surface condition and, consequently the grinding power and surface roughness in more complicated infeed cycle of grinding.

1. ま え が き

円筒プランジ研削において、砥石面に着目した研削サイクルの適応制御を実現するうえで、研削中に变化する砥石面性状を的確に把握し、研削動力や仕上面粗さとの関係を究明することは重要なことである。なぜなら1個の工作物を研削仕上する際、同一砥石面で、粗研削、精研削、スパークアウトなどを連続して行い、工作物ごとにこれを繰返すというプランジ研削サイクルにおいては、砥石面は高負荷研削と低負荷研削を繰返すことになり、研削サイクルが砥石面に与える影響は単純ではないと考えられるからである。ところが、切残し量に着目したプランジ研削過程の解析的研究¹⁾や、コスト、能率などに着目した研削サイクルの最適化の研究²⁾、また研削動力、粗さ、スパークアウト時間、砥石寿命などの研削現象のモデル化を試みる研究³⁾などが進められているのに比べ、この種の条件下での砥石面性状に関する研究は、測定の困難さもあって、非常に遅れている。そこで、先に開発した砥粒切れ刃群の逃げ面摩耗検出器⁴⁾を使用

して、この点の究明を試みた。本報は、粗研削と精研削を交互に繰返す交番切込みのモデル化実験により、砥石面性状を考察し、研削動力、仕上面粗さとの関係を把握して、研削機構の解明の一助とするとともに、任意の多段階切込みで構成される研削サイクルにおける砥石面性状を推定するための基礎資料を得ようとするものである。

2. 実 験 手 続

円筒プランジ研削で、砥石はWA 60 KmV、外径392 mm、周速32 m/s、工作物との周速度比100である。多石ダイヤモンドドレッサにより、その送り f_d と切込み t_d を変えた細目直し($f_d=0.05$ mm/rev, $t_d=0.005$ mm)、中目直し(0.1, 0.01)、荒目直し(0.3, 0.02)の3条件の目直しを行った。工作物はJIS合金工具鋼SKS 3, $H_R C=60$ 、外径63 mm、研削幅20 mm、半径とりしろ0.3 mmである。研削液はエマルジョン2.5%である。砥石の切込み速度は工作物1回転あたりの砥石切込み量 Δ ($\mu\text{m}/\text{rev}$)として表し、粗研削モデルとして $8 \mu\text{m}/\text{rev}$ 、精研削モデルとして $1 \mu\text{m}/\text{rev}$ を選定し、工作物ごとに交互に切込む「交番モード」の実験を中心に、その他比較のために、切込み量を一定とした「単一モード」の研削、および中間的な切込み量の研削とを行った。

* 原稿受付 昭和52年10月26日、昭和52年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和52年10月16日)にて発表。

** 正 会 員 機械技術研究所(東京都杉並区井草4-12-1)

*** 正 会 員 東京大学工学部(東京都文京区本郷7-3-1)

WA 60 KmV, SKS 3, エマルジョン: 2.5%, $f_d = 0.05$, $t_d = 0.005$ mm

図1 交番モード・細目直しの諸測定量の変動

研削動力は砥石軸駆動モータ回路に入れたワットメータにより測定し、工作物仕上面粗さは触針式計器により、工作物の円周方向4か所の中心線平均粗さを走査距離8 mm, カットオフ長さ0.762 mmで測定した。砥石面性状の表示量として、砥粒切れ刃の逃げ面摩耗面積率を採り、工作物交換時に測定した。使用した逃げ面摩耗検出器⁴⁾のスリットは砥石面上で幅方向(走査幅)2.5 mm, 円周方向0.31 mmとし、積分時間は1 s(砥石約26回転分)で、砥石円周上の平均値が求められる。

3. 実験結果と考察

3.1 交番モードにおける諸量の変動と偏り

図1に、細目直しをした砥石で、工作物1個あたりの半径とりしろ(研削量)を等しく、工作物ごとに8 μm/revと1 μm/revを交互に繰返した交番モードの研削実験の結果を示す。(a)は切込モードを示すもので、上の数

字は工作物の研削個数を示す。なお、工作物11個目からは、交番切込みの効果をより顕出させるために、3~2個の工作物を同一切込み量で連続研削した。(b), (c), (d)図中点線で示した単8, 単1とは、比較のために行った単一モードの切込み量8 μm/rev, 1 μm/rev研削における測定結果を示すものである。

以下、各測定量の特徴を述べる。(b)に示す研削動力は、砥石切込み量に対応して、粗研削と精研削とでは大きな値の開きをみせているが、同じ切込み量の単一モードと比べると、一層その差が拡大している。すなわち、交番粗研削では単8より大きい方に、交番精研削では単1より小さい方に偏っている。また、単一モードでは研削初期を除き、研削中の研削動力の増減はほとんどみられないのに対し、交番モードでは研削動力が粗研削中に減少し、精研削中に上昇するというパターンを繰返している。(c)に示す工作物仕上面粗さは、粗研削と精研削でやはり大きな差があるが、単一モードと比べると、同一切込みでも粗研削では単8より小さい方に、精研削では単1より大きい方に偏りを示している。(d)に示す砥粒切れ刃の逃げ面摩耗面積率は、交番モードでは両単一モードの間に値が存在し、粗研削中には摩耗面積率は減少し、精研削中には増大するというパターンを繰返している。また、工作物14個から16個の連続精研削中での摩耗面積率の増大、その後の2個の連続粗研削中での減少などはこの傾向が一層顕著である。

同様な実験を荒目直しをした砥石面で行った結果を図2に示す。諸量の変動パターンは図1と同じであるが、目直し条件が荒いことの影響を受けて、研削動力は低く、仕上面は粗く、砥石面の摩耗面積率も小さくなっている。また、仕上面粗さの応答性が後半はかなり鈍くなっている様子である。

図3は細目直しで単一モードの8 μm/rev研削を10個行った(図1, 単8と同じ)後に(a)に示すような組合せモードで砥石切込み量を変化させたときのものである。この場合には、切込み量が2 μm/rev程度までは、研削中に摩耗面積率が上昇し、研削動力は増加傾向に、仕上面粗さは減少傾向になるという先にみた精研削型の変動特性を示し、切込み量が5 μm/revを越えるとこれと逆な傾向の粗研削型の変動特性を示している。

図4は砥石円周方向の砥粒切れ刃群の逃げ面摩耗面積率を記録した一例である。かなりのばらつきを示し、この平均値が検出されてこれまでみた各図の(d)の値となっているわけである。しかし、この段階では、びびり振動と直結した摩耗密度の周期性⁴⁾はまだ認められない。

3.2 砥石面性状についての考察

WA 60 KmV, SKS 3, エマルジョン: 2.5%, $f_d=0.3$, $t_d=0.02 \text{ mm}$

図2 交番モード・荒目直しの諸測定量の変動

全く同じ砥石切込み量であるにもかかわらず、研削動力や仕上面粗さが交番モードにおいては単一モードの場合と異なる値および変動を示す原因が砥石面性状、この場合は砥粒切れ刃の逃げ面摩耗面積率の差異にあることが確かめられた。すなわち、切込み量が $1 \mu\text{m/rev}$ のように小さい精研削においては、研削中に摩耗面積率が上昇し、砥石面性状は密化し、 $8 \mu\text{m/rev}$ のように大きい粗研削では、逆に研削中に摩耗面積率の減少が起こり、砥石面性状は粗化する。これは砥石と工作物との接触面内における作用砥粒切れ刃の数や先端平面積が増、減することを意味し、このため研削動力の上昇、下降現象が生じるものと考えられる。単一モードの値からの偏りは、砥石面に研削履歴が残留するために起こる現象と考えられる。例えば、交番サイクル前段の粗研削により、砥石面に

WA 60 KmV, SKS 3, エマルジョン: 2.5%, $f_d=0.05$, $t_d=0.005 \text{ mm}$

図3 組合せ切込みモードの諸測定量の変動

は粗化履歴が残る、これが後段の精研削における研削動力を下げ、仕上面を粗くする。精研削中に徐々に密化が進むが、今度はこの精研削中の密化履歴が次のサイクルの粗研削における研削動力を上昇させ、仕上面粗さを下げる作用をするというわけである。

ところで、なぜ精研削中に砥石面が密化し、粗研削中には粗化するかということであるが、これは研削中の砥粒切れ刃の新生率、寿命、摩耗速度に依存している⁵⁾。砥石切込み量が小さいと、砥粒切れ刃の新生率、摩耗速度は小さいが、寿命が長く、脱落、破碎する切れ刃が非常に少ないため砥石面上の総摩耗面積はしだいに増加する。切込み量が大い、個々の切れ刃の先端は激しく摩耗

WA 60 KmV, SKS 3, エマルジョン: 2.5%, $f_d=0.05$, $t_d=0.005 \text{ mm}$, 19 個研削後

図4 砥石円周方向の砥粒切れ刃摩耗面の分布例

WA 60 KmV, SKS 3, エマルジョン: 2.5%

図5 摩耗面積率と研削動力の関係

図6 砥石切込み量と研削動力増加率の関係

するが、切れ刃の寿命が短く、切れ刃の更新が活発なので総摩耗面積としては減少することがしばしば起こり得るものと考えられる。このような、砥粒切れ刃挙動に基づいた砥石面性状の推定法については別報にゆずる。

3.3 摩耗面積率と研削動力の関係

砥石面性状が研削動力に大きな影響を与えることが実験結果によって示されたが、両者の関係を定量的に整理したのが図5である。図中の各種プロット符号は目直しと砥石切込みの各条件を示すもので、数字は砥石切込み量を示すものである。図から明らかなように、切込み量が一定であれば、研削動力は砥粒切れ刃の摩耗面積率にほぼ比例して増大する。これは摩耗面積率の大きい砥石面は作用切れ刃数が多いこと、またこうした砥石面で研削すると、同じ量の工作物を削除するにもかなりの量のエネルギーが工作物との摩擦や表面層の塑性流動のために消費されることを意味しており、切込み量が大いほど、このエネルギーロスが大きくなることがうかがえる。この関係を示したのが図6であり、砥石切込み量と図5の直線の勾配、すなわち摩耗面積率の増分に対する研削動力の増分比の関係を示したものである。切込み量の増

WA 60 KmV, SKS 3, エマルジョン: 2.5%

図7 摩耗面積率と工作物仕上面粗さの関係

加とともに摩耗面積あたりの研削動力増加率は増大している。この種のデータにより、砥石面性状の代表値である摩耗面積率が知れば任意の切込み量における研削動力を推定することが可能となる。

3.4 摩耗面積率と仕上面粗さの関係

次に、砥粒切れ刃の摩耗面積率と工作物仕上面粗さの関係をまとめた結果を図7に示す。横軸の摩耗面積率 ϵ は対数目盛であり、右側の砥石切込み量 $\Delta=8 \mu\text{m/rev}$ の図には、左側の $\Delta=1 \mu\text{m/rev}$ の直線を同じスケールで点線にて転載してある。両図から明らかなことは、ややばらつきが認められるが、砥石の切込みモードが同じであれば、仕上面粗さ $R (\mu\text{mRa})$ は摩耗面積率 $\epsilon (\%)$ の対数とほぼ直線関係にあること、および同じ摩耗面積率でも交番モードの $1 \mu\text{m/rev}$ 研削(交1)の方が単一モードの $1 \mu\text{m/rev}$ 研削(単1)よりも仕上面が粗く、 $8 \mu\text{m/rev}$ 研削では逆に交番モード(交8)の方が単一モード(単8)よりも仕上面が平滑になっていることである。

ところで、砥粒切れ刃の摩耗面積率は一定砥石面積上に存在する作用切れ刃の数とそれらの平均摩耗面積の積で与えられる。したがって、図7で各条件における砥粒切れ刃の平均摩耗面積が同じであれば、図7の横軸は砥粒切れ刃数でおきかえても同義である。この場合は、同じ切れ刃数でも仕上面粗さが異なることの原因は切れ刃の先端形状や分布形態にあることになり、 $1 \mu\text{m/rev}$ 研削では交番モード(交1)は単一モード(単1)よりも切れ刃先端が鋭く、切れ刃分布がより深いこと、 $8 \mu\text{m/rev}$ 研削では交番モード(交8)が単一モード(単8)よりも

WA 60 KmV, SKS 3, エマルジョン: 2.5%, $f_d=0.1$,
 $t_d=0.01$ mm

図8 交番切込みのモードを変えた例(中目直し)

切れ刃先端がより平坦で、切れ刃がより砥石表層に分布していることを意味しており、これは交番切込みの影響によるものと考えてよい。また、単1は交1よりも、交8は単8よりも精研削時間が長いだけ切れ刃あたりの平均切れ刃摩耗面積が大きいと考えれば、同じ摩耗面積率ならばそれだけ切れ刃数は減少するので、横軸を切れ刃数でまとめたとき、単1と交8の直線はさらに左側に移動することになるので、交番モードの影響が一層顕著に現れる。いずれにせよ、工作物仕上面粗さは切れ刃数の対数と直線関係にあり、その粗さレベルが砥石切込み量により、直線の勾配が砥粒切れ刃の先端形状、または分布形態により決定されるものと考えてよからう。このことは、今後、砥石面性状を推定し、かつ任意の砥石切込み量における仕上面粗さを推定するうえで有益な示唆を与えるものである。

3.5 交番切込みのモードの影響

交番モードにおいて、粗研削と精研削の研削量割合をこれまでみたような同量でなく、粗研削量割合を高めたときの結果を示したのが図8、図9である。これらは粗研削の工作物半径とりしろを0.3 mm、精研削のそれを0.04 mmとしたもので、図中では実線を表示してある。また、これまでみた同研削量交番モード(図1、図2)の粗研削の値を交8、精研削の値を交1として一点鎖線

WA 60 KmV, SKS 3, エマルジョン: 2.5%, $f_d=0.3$,
 $t_d=0.02$ mm

図9 交番切込みのモードを変えた例(荒目直し)

で表示し、単一モードはそれぞれ単8、単1と表示してある。これらの図からわかることは、この場合も交番切込みの効果が認められ、単一モードの値から明らかな偏りを示していること、ただし同研削量の交番モードと比べると、単8により近づき、単1からより離れているということである。目直し条件が異なってもこの傾向は同じである。これは交番サイクルに占める粗研削の割合が多いことに原因し、精研削による研削履歴がより軽いためと考えられる。このように、わずかな精研削割合でも砥石面が応答すること、および単一モードの値から任意の交番モードの値を推定できる可能性を示していることは注目される。

4. ま と め

多段階切込みのプランジ研削サイクルにおける砥石面性状、研削動力、仕上面粗さなどの推定法を追求して、粗研削と精研削を交互に繰返す交番切込みモードのモデル化実験を行い、以下の結果を得た。

(1) 砥石面性状は砥石切込み量の変化に対して、相当

に応答し、砥石切込み量とその作用時間に応じた砥石面性状の履歴をもつ。

- (2) 本実験の範囲では、交番モードの粗研削中に砥石面性状は粗化し、精研削中に密化する。このため研削動力は粗研削中に下降傾向を、精研削中には上昇傾向を示す。
- (3) 砥石面に残る研削履歴が原因で、交番モードの研削動力、仕上面粗さは単一モードの各値からの偏りを示し、交番粗研削では研削動力は大きく、仕上面粗さは小さくなり、交番精研削ではこれと逆方向に偏る。
- (4) 砥粒切れ刃の逃げ面摩耗面積率が增大すると、同じ砥石切込み量でも、研削動力はそれに比例して増大し、仕上面粗さは、切込みモードの影響を受けつつ、その対数に逆比例して減少することを明らかにし、その比例定数が求められた。

終わりに、本研究の実施にあたり御指導、御鞭撻をい

ただきました東京農工大学竹山秀彦教授、ならびに機械技術研究所の尾崎省太郎生産工学部長、玉高利一高機械加工課長、および同課の諸氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 例えば、中島利勝，中川平三郎：プランジ研削過程の研究，精密機械，**41**，11 (1975) 1066；**42**，4 (1976) 292；**42**，7 (1976) 686。
- 2) E. Salje: Strategien zur Prozeßoptimierung, beim Außenrundeinstechschleifen, Ind.-Anz., **95**, 51, (1973) 1088.
- 3) 井上英夫，野口豊生，須藤徹也，和井田 徹，玉高利一高，佐田登志夫：研削加工サイクル制御からみた研削現象の解析，精密機械，**42**，6 (臨時増刊) (1976) 471。
- 4) 須藤徹也，井上英夫，和井田 徹，野口豊生，玉高利一高：研削加工における砥粒切れ刃群の逃げ面摩耗検出器，精密機械，**43**，3 (1977) 336。
- 5) 須藤徹也，和井田 徹：研削砥石の作業面に関する研究 (第3報)，機械技術研究所所報，**27**，1 (1973) 16。