研 究

定切込みホーニングの切削機構*

上 田 隆 司** 山 本 明**

Cutting Mechanism of Constant Infeed Honing

Takashi UEDA and Akira YAMAMOTO

On the constant infeed honing, its cutting mechanism and influence of operating conditions on finishing performance are investigated. Moreover, applicability of the evaluating value $\bar{d}_i$, presented in the previous paper to express the severity of operating conditions, is examined. The results are as follows. In this honing operation, three typical cutting characteristics are observed as the operating condition becomes severe: that is, glazing type, transition type and breaking type of cutting edges. In the transition type, cutting characteristic changes from glazing to breaking at a stage in process of operation. As compared with the constant pressure honing, the workpiece is hardly ma-

chined like a barrel in shape, even in the case of a large over-run. $\bar{d}_i$ is found to be much useful for the effects of infeed rate and cutting speed, but a little for crosshatch angle. The surface roughness of finished workpiece can be improved by applying spark-out, but there is naturally a limit of improvement. As the peaks of roughness are cut by spark-out, the surface profile is similar to that of the plateau honing. And, spectrum analysis of the roughness makes it clear that the roughness is composed of many waves of which wave length is various but amplitude is approximately equal.

Key words: constant infeed honing, cutting type, cutting characteristics, evaluating value, surface roughness, spectrum analysis.

1. 緒 言

ホーニングの加工手段は砥石の切込み方式により、コーンを油圧で加圧する定圧加工と、コーンをねじで加圧する定切込み加工に分けられる。定圧加工には砥石臨界圧力を利用すれば効率よく加工を行うことができる、切削開始時に速やかに砥石を加工物表面に接触させることができる、加工機構が簡単であり砥石に過大な力が作用する恐れがない、などの利点がある。このため、一般の加工にはよくこの方式が採用されており、特に多種少量の加工物を加工する場合によくとされている。これに対し、定切込み加工は切り込んだ量を強制的に取り除くことができ、加工物の形状精度の修正が行いやすい、などの特長があり、ホーニング加工の高精度化や自動化が進むにつれてこの方式もよく行われるようになってきた。しかし、砥石の切削能力が低下すると砥石ヘッドに過大な力が作用し、発熱して加工精度が低下するだけでなく、時には砥石や機器の破損を招く恐れがある。そこで、安定した効率よい加工を行うためにはその切削機構を正しく把握する必要がある。

本研究では、基礎的な定切込み外面ホーニングによって、その切削機構や加工条件が切削性能に及ぼす影響を調べると共に、別報¹⁾で報告した加工条件の過酷さを表

す評価値としての設定切込み深さ $\bar{d}_i$ の妥当性についても検討した。

2. 実 験 方 法

2.1 実験装置および実験条件

作業を簡単にするため、実験は1本の砥石で円筒外面を仕上げる外面ホーニング加工で行った。実験装置は円筒研削盤を利用したもので、図1にその概略図を示す。回転速度 V_w は直流モータ、往復速度 V_s は油圧機構で与えられ、いずれも無段変速することができる。定切込み量は減速歯車列を介した直流モータで与えられ、これも無段変速が可能である。実験条件を表1に示す。Iは加工進行に伴う切削状態の変化を調べるときなどに用いた加工条件であり、目的に応じて切削距離 L を変化させている。IIは切削速度 $\bar{V}$ の影響を調べる実験であり、砥石の総切込み量を一定としている。このため、 $\bar{V}$ が大きくなると切削距離は長くなる。IIIは交差角 2θ の影響を調べる実験であり、 $\bar{V}$ が一定となるように回転速度 V_w と往復速度 V_s を変化させている。測定量は切削量 ΔD 、砥石損耗量 ΔS 、仕上面粗さ R_a 、切削抵抗、砥石切込み量である。 ΔD は加工物直径減少量を電気マイクロメータを使ったフォークゲージで、 ΔS は最小目盛 $1\mu\text{m}$ のダイヤルゲージで、 R_a は触針式表面粗さ計(カットオフ値 0.8mm)で測定した。切削抵抗は図1に示すように、砥石ホルダ部に設置した弾性八角リングによって、砥石押付力 F_n 、切削抵抗接線分力の回転方向成分 F_t 、スト

* 原稿受付 昭和57年4月12日。昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和56年11月5日)にて発表。

** 正 会 員 大阪大学基礎工学部(豊中市待兼山1-1)

Fig. 1 Block diagram of experimental equipment

Table 1 Honing conditions

	Symbol	I	II	III
Cutting speed	$\bar{V}$ m/min	25	10-40	15
Crosshatch angle	2θ deg	30	30	10-60
Cutting length	L m	25-250	50-200	100
Stroke	S mm	80	80	80
Over-run	a mm	15	15	15

ロック方向成分 F_s を検出した。また、砥石切込み量を電気マイクロメータで検出し、これより切込み速度 t を求めた。

2.2 使用材料

加工材料は球状黒鉛鋳鉄 FCD 40 (連棒棒, 硬さ HB 150, $\phi(70\sim75)\times 100$ mm) の丸棒であり, 使用前に旋削によって平均粗さ $R_a=3.0\sim4.5\ \mu\text{m}$ に前加工した。使用した砥石は表 2 に示すように, 粒度, 結合度を変化させた 7 種類の WA ビトリファイド砥石であり, 使用前に #120 の研磨布を加工物との間に挟んでドレスする

Table 2 Stone used

Stone	Symbol	Structure %			Rockwell H Hardness
		Grain V_G	Bond V_B	Pore V_P	
WA 150 K	N 2	46.2	12.9	40.9	43.0
WA 150 J	N 3	42.8	13.6	43.6	28.7
WA 150 H	N 4	43.2	11.8	44.8	10.2
WA 150 G	N 5	42.5	11.5	46.0	-9.3
WA 100 J	A 1	43.7	17.1	39.2	—
WA 150 J	A 2	43.9	12.1	44.0	—
WA 320 J	A 3	45.2	11.2	43.6	—
WA 600 J	A 4	44.9	10.9	44.2	—

Dimensions; width $8\times$ thickness $10\times$ length 50 mm

ことにより, 加工物との接触状態を良くするとともに, 各実験における加工ははじめの砥石作業面の状態をそろえた。加工油は無添加のスピンドル油 (粘度 10.7 cSt, 30°C) を毎分 3 L 供給し, ガラス繊維を用いたフィルターで濾過することにより, 切りくずや脱落砥粒を除去した。

3. 実験結果および検討

3.1 オーバランの影響

図 2 はオーバランが砥石形状および加工物仕上形状に及ぼす影響を調べた結果である。図の縦軸は砥石および加工物の両端からの相対形状であり, 正が凸形, 負が凹形を表している。実験の範囲では, オーバラン

α が大きくなるほど加工物が均一に加工されており, 同程度に大きくすると中央部が凸形になった定圧加工の場合と異なる²⁾。また, 砥石は $\alpha=10\sim15$ mm ではほぼ均一に損耗するので, 実験では定圧加工の場合と条件をそろえることも考慮して, $\alpha=15$ mm とすることにした。

3.2 切削形態の分類

図 3 は定切込み加工における三つの典型的な切削形態であり, これらは切込み速度 t を変化させている。(1) は切れ刃摩耗型で, t が小さく, 加工条件が過酷でない場合に生じる。加工進行と共に切れ刃が摩耗して切削能力が低下し, ついには目つぶれ状態となる。このため, ΔS が小, ΔD が小, G が大, R_a が小となる。この切削形態は定圧加工において, 砥石圧力 P_n を臨界圧力 P_c 以下に設定した場合に相当するが, 定切込み加工では切削

Fig. 2 Influence of over-run on shape of stick and workpiece

Experimental condition I, WA 150 J, FCD 40, $\bar{V}=25$ m/min, $2\theta=30^\circ$, $L=100$ m, $t=135\ \mu\text{m}/\text{min}$ ($d_i=2.58\ \mu\text{m}$)

Fig. 3 Typical cutting characteristics of constant infeed honing
 Experimental condition I, WA 150 J, FCD 40, $\bar{V}=25 \text{ m/min}$, $2\theta=30^\circ$

Fig. 4 Influence of stick on cutting characteristics
 Cutting characteristic: ● Breaking type, ○ Transition type, ○ Glazing type
 Experimental condition I, FCD 40, $\bar{V}=25 \text{ m/min}$, $2\theta=30^\circ$, $L=250 \text{ m}$

能力の低下と共に切込み量が蓄積して F_n が次第に大きくなってゆき、加工を続けると砥石や装置が破損する恐れがある。このため、切削距離 L の設定がきわめて重要となる。(3)は加工条件が過酷な場合に生じる脱落型であり、切れ刃の更新が激しく行われ、砥石は常に切削状態にある。このため、加工進行とともに ΔD , ΔS が増大、 G が小、 R_a が大となる。この切削形態は定圧加工において P_n を P_c より大きく設定した場合に相当し、切削

抵抗 F_n , $\bar{F} (= \sqrt{F_s^2 + F_t^2})$ はほぼ一定となる。(2)は移行型で、切込み速度 t を(1)と(3)の中間値に設定した場合である。加工初期は摩耗型の切削形態を示すが、加工進行とともに切込み量が蓄積して F_n が大きくなると、砥石は F_n に対抗できなくなり脱落型に移行する。図では $L=220 \text{ m}$ 付近で脱落型に移行している。しかし、この切削形態は基本的には(1)の摩耗型とみるべきである。

図4は砥石の粒度および結合度が切削形態に及ぼす影響を調べた結果で、切込み速度 t の大きさによって加工条件の過酷さが変わり、これに応じて切削形態が変化している。 $\bar{d}_i$ は後述の式(3)によって計算した値である。脱落型となるためには、結合度(RH硬度)の大きい砥石、および粒径の大きい砥石ほど、加工条件を過酷にしなければならない。ここで、脱落型に移行する臨界の $\bar{d}_i$ を臨界切込み深さ $\bar{d}_{ic}$ と名づけておく。これは定圧加工の臨界圧力 P_c に対応する。

設定した量を強制的に削り取るという定切込み加工法の目的から考えると、砥石損耗による減量を考慮するなら、図3の脱落型が望ましい切削形態といえ、切込み深さとしては $\bar{d}_{ic}$ よりやや大きい値に設定すべきであろう。そこで、次節で行う切削性能の検討はこの形態に対して行うことにする。

3.3 加工条件の切削性能への影響

ここでは別報¹⁾に従い、1本の砥石を運動方向に直角的な切れ刃長さ l_e をもつ一つの工具にモデル化して扱うことにする。定切込み加工では、設定切込み深さ $\bar{d}_i$ に対して、モデル化した砥石は切込み深さ $\bar{d}$ で切削することになる。ここで、

$$\bar{d} = \frac{\pi DB(B-l+2a)}{n\bar{V}\{l(B-l+2a)-a^2\}\cos\theta} \cdot \frac{d(\delta R)}{d\tau} = K \cdot \frac{d(\delta R)}{d\tau} \quad (1)$$

$$l_e = \frac{1}{B-l+2a} \{l(B-l+2a)-a^2\} \cos\theta \quad (2)$$

ただし、 a : オーバラン、 B : 加工物幅、 D : 加工物径、 l : 砥石長さ、 n : 砥石本数、 $\bar{V}$: 切削速度、 2θ : 交差角、 $d(\delta R)/d\tau$: 加工物半径減少速度。

K は設定加工条件で決まる定数であり、 $d(\delta R)/d\tau$ は加工材料、砥石種類、 K の大きさに強く影響されるとともに、時間的に変化する。このため、 $\bar{d}$ も時間的に変化する。

式(1)において、砥石損耗が0で、切り込んだ量すべてが切削される理想的な場合の $\bar{d}$ が $\bar{d}_i$ に相当し、このとき、 $d(\delta R)/d\tau = t$ となることから、

$$\bar{d}_i = \frac{\pi DB(B-l+2a)}{n\bar{V}\{l(B-l+2a)-a^2\}\cos\theta} \cdot t = Kt \quad (3)$$

$\bar{d}_i$ は加工条件だけで定まる値であり、加工条件の過酷さを表す一つの評価値として利用できる。

そこで、以下、実験結果の整理には式(1)、(3)を用いることにし、これにより加工条件が切削性能に及ぼす影響を調べるとともに、 $\bar{d}_i$ の、加工条件の過酷さを表す評価値としての妥当性について検討することにする。

3.3.1 切込み速度および切削速度の影響

図5は切削速度 $\bar{V}$ 一定のもとで切込み速度 t を変化

Fig. 5 Influence of infeed rate and cutting speed on finishing performance
Experimental condition I, II, WA 320 J, FCD 40, $2\theta = 20^\circ$, Cutting time; 5 min

させた場合と、 t 一定のもとで $\bar{V}$ を変化した場合の切削性能を $\bar{d}_i$ で整理した結果である。 G は砥石損耗量で切削量を割った仕上比、 R_a は加工後の仕上面平均粗さである。 $\bar{d}_i$ が大きくなるほど $\bar{d}$ が大きくなり加工性能は良くなるが、加工条件が過酷になるため G が小さくなり、 R_a も粗くなる。一方、式(3)より明らかなように $\bar{V}$ の増大は $\bar{d}_i$ を減少させ、逆に t の増大は $\bar{d}_i$ を増大させるように作用するが、 t 変化、 $\bar{V}$ 変化、いずれの場合もほぼ同一曲線上にデータが集まっていることから、評価値 $\bar{d}_i$ を用いることによりこれらの影響を同一レベルで評価できることがわかる。

3.3.2 交差角の影響

図6は交差角 2θ の影響を調べた結果であり、 $\bar{d}_i$ の計算結果も示してある。式(3)より 2θ が大きくなれば $\bar{d}_i$ は大きくなり、加工条件は過酷になるが、図6に示すように、 $0^\circ < 2\theta < 30^\circ$ までは $\sec\theta$ 、したがって $\bar{d}_i$ の変化は小さく、ほぼ一定とみなすことができる。しかし、 $2\theta > 30^\circ$ になると $\bar{d}_i$ は次第に大きくなってゆき、加工条件は過酷になる。これに伴って図5でみたように、 G は小さくなり、 R_a も粗くなると考えることができる。ところが、切削量に相当する $\bar{d}$ は図5のように増大せず、逆に減少している。これは、切れ刃砥粒にかかる切削力が同一方向よりもある角度をもった交差力として作用する方が、破砕もしくは脱落が起こりやすいことを示している。したがって式(3)は、交差角の異なるデータを比較

Fig. 6 Influence of crosshatch angle on finishing performance
Experimental condition III, WA 600 J, FCD 40, $\bar{V}=15$ m/min, $t=50$ μm /min, $L=100$ m

Fig. 7 Effect of grain size on finishing performance
Experimental condition I, Grain; WA, Hardness; J, FCD 40, $\bar{V}=25$ m/min, $2\theta=30^\circ$, $L=250$ m, $t=150$ μm /min

Fig. 8 Effect of stick hardness on finishing performance

Experimental condition I, WA 150, FCD 40, $\bar{V}=25$ m/min, $2\theta=30^\circ$, $L=250$ m, $t=100$ μm /min

する場合、 $2\theta > 30^\circ$ において評価値としての適性をやや失うことになる。

(1) Improvement of surface roughness with proceeding of spark-out

(2) Influence of grain size

Fig. 9 Effect of spark-out on surface roughness

Experimental condition I, FCD 40, $\bar{V}=25$ m/min, $2\theta=30^\circ$, $t=100$ μm /min ($\bar{d}_t=1.79$ μm)

3.3.3 砥石の粒度・結合度の影響

図 7, 8 が砥石の粒度・結合度の影響を調べた結果である。式 (3) はこの二つの条件を含まないから ($\bar{d}$ では $d(\delta R)/d\tau$ に含まれる), 他の加工条件が同じなら, $\bar{d}_t$ は同じ値となり, 加工条件の過酷さは等しくなる。ところが図では, 粒度が大きくなるほど, また結合度 (RH 硬度) が高くなるほど $\bar{d}$ が大きくなるので, この場合には砥石の刃物としての強度が上昇していると考えられる。したがって, 仕上比 G も大きい。一方, 仕上面粗さ Ra は, 砥粒径には依存するが, 結合度の影響はほとんど受けていない。

3.4 仕上面粗さ

3.4.1 スパークアウトの影響

定圧加工では加工物仕上面粗さをコントロールすることは一般にむずかしいが, 定切込み加工ではスパークアウトによってある程度可能と考えられる。これは, $\bar{d}_t$ の大きい加工の場合, それの小さい加工に変えることに相当する。図 9 はスパークアウト時間の仕上面粗さ Ra への影響を調べた結果である。スパークアウト初期ではよく改善されるが, 次第に限界粗さに収束するので, 時間を長くしても効果は少ない。また, この限界粗さは砥粒径が小さい砥石ほど小さくなる。

図 10 は加工物仕上面のプロフィールであるが, スパークアウトによって粗さの山が削り取られていることがわかる。このように, 谷の深い条痕が残る仕上面はプラトーホーニングしたときに得られる仕上面によく似ている³⁾。

3.4.2 仕上面粗さの周波数分析

ホーニング加工した仕上面にはこの加工法特有のクロスハッチ条痕が形成される。そこで, 円筒面の軸方向に測定した表面粗さを周波数分析し, その波長成分を調べてみた。図 11 (1) は旋削した前加工面であり, 波長 200 μm 付近に卓越したピークが存在する。また, 全体的に 60 μm 程度以上の長波長をもつ粗さが多い。ところが,

Fig.10 Profile of finished surface
Experimental condition I, WA 600 J, FCD 40, $\bar{V}=25$ m/min,
 $2\theta=30^\circ$, $t=100$ μ m/min ($\bar{d}_i=1.79$ μ m)

(1) Surface from preceding process
(Turning : infeed 0.2 mm/rev)

(2) Finished Surface (WA150J, $\bar{V}=25$ m/min, $2\theta=30^\circ$,
 $t=100$ μ m/min, $\bar{d}_i=1.79$ μ m)

Fig.11 Spectrum analysis of surface roughness
Workpiece; FCD 40

この面をホーニング加工すると, (2)(a) のように目立

ったピークはなくなり, また砥石粒度や交差角, 切削速度などの加工条件を変化させても特徴ある結果は得られなかった. 更に, スパークアウトを施した面になると, (2)(b) のように, 長波長成分の粗さが更に減少する. このことから, ホーニング加工で得られる仕上面には, 切削条痕が交わるクロスハッチのため特定の波長をもつ粗さは存在せず, いろいろな波長の粗さがほぼ均等に存在していることがわかる.

4. 結 言

定切込みホーニング加工を取りあげ, その切削機構や加工条件が切削性能に及ぼす影響を調べるとともに, 前に提案した加工条件の評価値 $\bar{d}_i$ の妥当性についても検討した. 得られた結果をまとめると次のようになる.

- (1) 定切込み加工には三つの切削形態があり, 加工条件が過酷になるに従い, 切れ刃摩耗型, 移行型, 切れ刃脱落型と変化するが, 設定した量を削り取るには脱落型が望ましい.
- (2) 定圧加工と異なり, オーバランをある程度大きくしても加工物形状は樽形になりにくい.
- (3) 評価値 $\bar{d}_i$ により切込み速度や切削速度を同一レベルで評価できるが, 砥石の刃物としての強度にも影響を及ぼす交差角に対してはやや適性を失う.
- (4) スパークアウトを施すことにより, 仕上面粗さをある程度改善できるが, 限界粗さが存在する. このとき得られた仕上面はプラトーホーニングによる加工面に似て, 粗さの山のみが削り取られ, 谷の深い条痕が残される.
- (5) 仕上面の軸方向にはクロスハッチによって特定波長の粗さが生ずることはなく, いろいろな波長をもつ粗さがほぼ均等に存在する.

参 考 文 献

- 1) 上田隆司, 山本 明: ホーニング機構に関する一考察, 精密機械, 48, 11 (1982) 1514.
- 2) 上田隆司, 山本 明: ホーニング加工の高能率化 (第1報), 精密機械, 46, 7 (1980) 818.
- 3) 玉高利一高: ホーニング加工技術, 機械と工具, 12 (1980) 97.