研 究

ホーニング加工の高能率化 (第3報)*

—炭素鋼ホーニング加工の高速化に伴う切削性能の変化原因とその対策—

上 田 隆 司** 山 本 明**

Contribution to High Efficient Honing (3rd Report)
—Cause and Improvement of Deterioration of
Finishing Performances in Steel Honing
with Increased Cutting Speed—

Takashi UEDA and Akira YAMAMOTO

The purpose of this report is to investigate the cause of deterioration of finishing performances in 0.45% plain carbon steel honing with increased cutting speed and to find out the conditions and means which enable to improve the finishing performances. At high cutting speed, difficulty of removal of continuous flow type chip brings the results that finishing performances deteriorate extremely over a limited range of cutting speed, where chip welds severely on stick and work surface, and after all annealed steel can be no

more machined. Taking notice of cutting speed, this phenomenon is similar to the growth of built-up-edge in cutting operation. One method capable to hone successfully at high cutting speed is to use a sulfur treated porous stick with big spherical pores which works effectually to removal of chip, but it ended in failure to make a smooth surface. Another method is to apply a sulfurized fatty oil, and this application made it possible to operate honing successfully over all tested range of cutting speed. Because, this oil has the effect to remove chip easily by preventing it from growing and welding.

Key words: high efficient honing, carbon steel, high cutting speed, honing chip, loading, porous stick, sulfurized fatty oil.

1. 緒 言

前報¹⁾では加工材料に、熱処理によって硬度を3段階に変化させた炭素鋼 S45C を用いて、炭素鋼ホーニング加工の高速化の可能性について検討した。このとき、焼きなました硬度の低い材料では高速になると切りくずの溶着が激しく起こり、加工が不可能となった。これより硬度を高くした材料では切削速度 $\bar{V} \approx 60 \sim 120$ m/min で砥石がチップングしたが、加工を続けることは可能であった。更に硬度を高くした材料では、試みた切削速度全域で加工が可能となったが、 $\bar{V} \approx 60 \sim 120$ m/min の領域で砥石損耗が多く、仕上面粗さや真円度も悪くて、加工を避けるのが適当と考えられた。このように特定の切削速度領域で切削性能が急激に変化する現象は、旋削加工における構成刃先の成長・消滅による現象とよく似ており、ホーニング加工においても同様の原因が考えられる。

そこで本報では、これら3段階に硬度を変えた炭素鋼 S45C に対して、高速化に伴う切削機構の変化について検討を加えることにより、切削性能が悪化する速度領域の発生原因を明らかにすると共に、安定した高速ホーニング加工を可能にする改善策についても検討した。

2. 研 究 方 法

2.1 使用した加工材料および砥石

加工材料には炭素鋼 S45C、および鋳鉄 FC10 を用いた。S45C は前報と同じ材料で、850~900°C に1h 保持した後炉冷して焼きなました S45C-N (Hv 175)、880°C に40 min 保持した後、それぞれ60°C および20°C の油で焼入れした S45C-H (Hv 302)、S45C-HH (Hv 396) の3種類である。鋳鉄は第1報²⁾で用いたものと同じ FC10 (Hv 204) である。形状はいずれも $\phi(70 \sim 65) \times 100$ mm の丸棒である。

使用した砥石は表1に示す WA 系ビトリファイドボンド砥石で、寸法は $10 \times 10 \times 50$ mm である。N3 砥石は前報表2の N3 砥石と同じ砥石であり、S 砥石は気孔中

表1 使用砥石 (WA 150)

	砥石 記号	組 織 (%)			ロック ウェル H 硬度 RH
		砥粒率 V_G	結合剤率 V_B	気孔率 V_P	
普通砥石	N3	43.9	12.1	44.0	31.1
多孔性砥石	P	34.0	15.0	51.0	—
いおう処理砥石	S	44.2	11.8	8.1	92.2
	P(S)	34.0	15.0	23.3	—

注) S 砥石、P(S) 砥石の気孔に対するいおうの充てん率は、それぞれ81.5%、54.3%である。
P 砥石、P(S) 砥石の気孔率には空孔の占める体積も含まれている。

* 原稿受付 昭和55年9月19日。精機学会昭和55年度関西地方定期学術講演会(昭和55年7月10日)にて発表。

** 正 会 員 大阪大学基礎工学部(豊中市待兼山町1-1)

表2 加工油

項 目	A	C
比重 15°C/4°C	0.875	0.861
粘度 30°C (m ² /s)	0.107	0.102
油脂分 (%)	—	8.5
いおう分 (%)	—	0.85
銅板腐食 100°C, 1 h	1	2

にいおうを物理的に充てんしたものである。P 砥石は多孔性砥石³⁾で、普通砥石に比べて砥粒率 V_G が小さく、気孔率 V_P が大きい。この砥石は砥粒と結合剤の混合段階でスチレンボールを混ぜ合わせ、流し込み法で成形して焼成される。気孔の様子は後の図9にみるようで、平均径は約 1.5 mm、空孔量は 300 cm³/kgf である。P(S) 砥石は P 砥石の気孔中に物理的にいおうを充てんしたものであるが、空孔は充てんされなかった。

2.2 使用した加工油

使用した加工油は表2に示す A, C の2種類である。加工油 A は 60 スピンドル油 80% と E スピンドル油 20% の混合油であり、油性向上剤は添加されていない。加工油 C はスピンドル油に硫化脂肪を添加した硫化極圧油である。両者の粘度はほぼ等しくしてある。

2.3 実験方法および実験条件

加工条件は前報と同様 1 本の砥石で円筒外面を仕上げる方法によった。実験条件は前報の表3と同様、切削速度 $\bar{V}=30\sim150$ m/min, 交差角 $\theta=5^\circ$, 切削距離 $L=400$ m, ストローク $S=80$ mm, オーパラン $a=15$ mm である。加工油は毎分 3 L 供給し、ガラス繊維を用いたフィルタ 2 か所で濾過した。加工物は旋盤によって平均粗さ $R_a=4.0\sim6.0$ μm に前加工し、砥石は使用前に加工面になじますため研磨布 #120 でドレスした。

砥石作業面の目づまり量は鉄の定量分析法として一般的な α -フェナントロリン法によって測定した。操作手順は文献 4) と同様である。

3. 切削状態の検討

鋳鉄加工では切削速度の変化によって切削性能がほぼ連続的に変化した。炭素鋼 S45C では急激に悪化する特異領域が存在した。そこで、鋳鉄加工の場合と比較することによって、S45C に特異領域が生じる原因について考察してみた。

3.1 高速度加工における切削状態

図1は S45C-H を $\bar{V}=50$ m/min および 150 m/min で加工したときの切削抵抗 $\bar{F}$ と砥石押付力 F_n の比 $\bar{F}/F_n$ の切削進行に伴う変化を追ったものであり、砥石圧力 P_n が臨界圧力 P_c よりも大きい場合と小さい場合を

Fig.1 Variation of cutting force ratio in process of finishing S45C-H, N3 stone, Coolant A

Fig.2 Amount of loading metal w on stick surface S45C-HH, Coolant A, $L=400$ m, P_c ; Critical pressure

比較している。 $\bar{V}=50$ m/min の場合、 $\bar{F}/F_n$ は $P_n < P_c$ のとき切削進行と共に低下しており、砥石が切削状態から磨き状態へと移行している。一方、 $P_n > P_c$ のとき $\bar{F}/F_n$ は大きな値でほぼ一定となっていることから、切れ刃が脱落状態にあり、更新する切れ刃によって切削が行われていることがわかる。これに対し、高速度加工になると $P_n < P_c$, $P_n > P_c$ いずれの場合においても $\bar{F}/F_n$ は切削開始直後から低下しており、 $P_n > P_c$ の場合でも切れ刃の自生作用が低下し、目づまりあるいは目つぶれ状態にあると考えられ、低速度加工の場合と異なることがわかる。この傾向は加工材料が S45C-HH の場合にも認められた。

一方、図2は切削後の砥石作業面の目づまり量 w を測定した結果である。 $P_n > P_c$ において、 $\bar{V}=50$ m/min では w は低下するのに対し、 $\bar{V}=150$ m/min では急激に増大している。前者では、切削砥粒の破碎ないしは脱落時に目づまり金属も脱落するからである。

更に、この作業面のロックウェル硬度 (RH) を測定すると、図3のようになる。 $\bar{V}=150$ m/min のとき $P_n > P_c$

Fig. 3 RH hardness of stick at working surface after finish
S45 C-HH, N3 stone, Coolant A, $L=400$ m

において大きくなっており、目づまりによって切れ刃砥粒が補強される傾向にあることがわかる。

これらの結果から、高速度加工では切りくずの排除が困難となり、 $P_n > P_c$ においても切りくずが気孔を満たして切れ刃の切込みを減少させる目づれ状態にあると考えることができる。

3.2 特異領域の発生原因

図4は(1) 鋳鉄、(2) S45 C-HH 加工後の砥石作業面であり、目づまりしている箇所が黒く現れている。(1)ではほぼ均一に目づまりしているのに対し、(2)では目づまりが偏在して、図7のように大粒の目づまりに発達することがある。図5はこの砥石の横断面であるが、(1)の鋳鉄加工では砥石の内部深くにまで目づまりが及んでいるのに対し、(2)のS45 C-HH 加工では作業面のごく表面に限られている。また、砥石作業面を走査電顕で観察すると、図6のように、鋳鉄加工では砥粒表面に細かい粒状の切りくずが付着しているのに対し、S45 C-HH 加工では流れ形切りくずが多数存在している。

Fig. 4 Aspects of loading on working surface of stick
 $\bar{V}=150$ m/min, N3 stone, Width of stick; 10 mm

したがって、鋳鉄では切りくずが細かい粒状となるため砥石気孔中に侵入して拡散しやすく、一様に目づまりする。これに対し、S45 C-HH では切りくずが流れ形となるため砥石内部に侵入できず、切りくずがからみ、あるいは溶着して大粒の目づまりを発達させるといえる。

図7(1)は砥石作業面にできた長さ0.6 mm程度の溶着型目づまりであるが、流れ形切りくずが所々に付着して

Fig. 5 Penetration of loading metal into stick
Upside; working surface of stick corresponding to Fig. 4

Fig. 6 Chips on stick surface by SEM
N3 stone, Coolant A, $\bar{V}=150$ m/min, $P_n=262$ kPa, $L=200$ m (1), 400 m (2)

いる。

以上のことから、切りくずを適切に排除して溶着を防ぐことが安定した高速ホーニング加工を可能にすると考えることができ、このためには次のような手段が考えられる。

- (1) 切りくず排除能力を高める。
- (2) 切りくずの逃げ場所をつくる。
- (3) 切りくずの溶着を抑制する。

4 節ではこの考えに基づいた具体的な改善方法について検討する。

ところで、特定の切削速度域において切削性能が急激に悪化する様子は旋削における構成刃先の成長・消滅現象とよく似ている。構成刃先は切削温度と深い関連があるため、切削時の発熱量 Q と仕上面粗さ R_a の関連を調べてみた。発熱量は $Q = \bar{F} \cdot \bar{V} / J$ で与えられ、 $\bar{F}$ は切削抵抗、 $\bar{V}$ は切削速度、 J は仕事当量である。図 8 は $\bar{V} = 30 \sim 150$ m/min の測定値から求めた図であるが、斜線の領域で R_a が粗くなっており、切りくずの溶着現象が切削温度と深い関連のあることがわかる。

一方、 $\bar{V} = 150$ m/min で加工したとき、図 7 (1) のような目づまりや、図 7 (2) のような薄い箔状の大きな目づまりを生じることがある。しかし、目づまりが加工物表面に溶着することなく、良好な仕上面が得られることから、仕上期では目づまりと加工物表面の間に存在する加工油の働き、すなわちマイクロバットの集合とみなせる接触面の接触点に発生するくさび形油膜による加工表面の保護作用を無視することはできない。

4. 切削性能の改善方法

本節では、切りくずの激しい溶着のため高速度加工が不可能であった硬度の低い S 45 C-N を加工材料に用いて、3.2 節における検討を基礎に具体的に切削方法の改善を試みた。

4.1 砥石による改善

ダイヤモンド砥石やボラゾン砥石のような砥石損耗が少なく切削量の多い砥石では、砥石幅を小さくして切りくずの排出を容易にする方法がとられている。そこで、砥石幅を従来の $1/2$ の 5 mm とし $\bar{V} = 150$ m/min で加工してみたが、砥石にチップングが起こり、期待した効果は得られなかった。

多孔性砥石 P は図 9 のように大きな空孔を多数もった砥石であり、この空孔が加工中の切りくずの逃げ場所となって溶着を防止することが期待できる。図 10 (1) は P 砥石で加工したときの切削性能の変化を追ったもので

Fig. 7 Adhesive chips on stick surface

Fig. 8 Influence of cutting energy Q on surface roughness of workpiece
S 45 C-H, N 3 stone, Coolant A, $L=400$ m

Fig. 9 Effectiveness of porous stone
Length of stick; 50 mm

あり、 ΔS が砥石損耗量、 ΔD が切削量、 R_a が仕上面粗さ、 L が切削距離である。N 3 砥石で不可能であった $\bar{V} = 120$ m/min での加工も、この砥石の使用によって可能となったが、砥石が軟らか過ぎるため ΔS が多く、このままでは応用できない。そこで、P 砥石をいおう処理して補強した P(S) 砥石を用いてみた。図 10 (2) のように、 ΔS は小さくなって改善されたが、砥石作業面の大きな空孔のために R_a が改善されず、更に工夫を要する。

砥石気孔中に充てんされたいおうは種々の働きをするが⁴⁾⁵⁾、その潤滑効果および目づまり抑制効果に期待したいおう処理砥石 S を用いてみた。しかし、高速になると切りくずの溶着による砥石のかじり現象が起こり、高速度加工は不可能であった。

Fig. 10 Finishing characteristics of porous stick

 Fig. 11 Improvement of finishing characteristics by using EP oil
S45C-N, N3 stone, $L=400$ m, $G=\Delta D/\Delta S$, C : roundness

4.2 硫化極圧油の使用

スピンドル油にいおうを添加した硫化極圧油 (加工油 C) を用いてみた。硫化極圧油を用いた場合、切りくずは硫化鉄 FeS が生じることはすでに X 線マイクロディ

Fig. 12 Influence of coolant oils on finishing characteristics

S45C-HH, N3 stone, $\bar{V}=150$ m/min, $L=400$ m

フラクトメータを用いて確認しており、切削性能の向上も認められた⁵⁾。

加工油 A と C の使用結果が図 11 であり、臨界圧力 P_c および P_c における切削性能を比較している。 ΔS が砥石損耗量、 ΔD が切削量、 $G=\Delta D/\Delta S$ が仕上比、 R_a が仕上面粗さ、 C が真円度、 $\bar{F}$ が切削抵抗、 F_n が砥石押付力である。極圧油の効果は大きく、加工油 A で加工不能であった高速度域においてもすぐれた切削性能を示し、切削性能が悪化する特異領域も現れていない。また、 $\bar{V}$ の高速化に伴う P_c や ΔS の変化は第 1 報の鋳鉄加工と似ており、加工油 C の使用によって切削機構が大きく変化したことがわかる。したがって、安定した S45C の高速度加工を行うために、硫化極圧油の使用が有力な手段であるといえる。

5. 硫化極圧油の働き

図 12 は S45C-N よりも硬質の S45C-HH を加工し、極圧油の使用効果を調べたものである。 ΔS が砥石損耗量、 ΔD が切削量、 $G=\Delta D/\Delta S$ が仕上比、 R_a が仕上面粗さである。加工油 A 使用では $P_n > P_c$ において目つぶれ状態にあるのに対し、加工油 C では P_c を超えると砥石

Fig. 13 Profile of finished surface
S 45 C-HH, $\bar{V}=150$ m/min, $L=400$ m

Fig. 14 Amount of loading metal w on stick surface
S 45 C-HH, N 3 stone, $\bar{V}=150$ m/min, $L=400$ m

が急激に損耗して R_a が悪化する通常の切削性能のパターンを示しており、正常な切削が行われていることがわかる。また、図 13 のように加工物の仕上面粗さもよく改善されている。

高速加工では切りくずが切削性能に大きな影響を及ぼしていることから、 $P_n < P_c$ で使用した砥石の目づまり状態を調べてみると、図 4 (3)、図 5 (3) のように (1) の铸铁加工の場合と同様、砥石作業面全体に均一に、かつ砥石内部深くにまで目づまりが及んでおり、(2) の加工油 A 使用と大きく異なっている。そこで、加工後の砥石目づまり量 w を測定して比較してみると、図 14 のように加工油 C 使用では目づまり量が多くなっており、しかも P_c 付近で最大となる通常の切削で起こるパターンを示している。更に、切削開始後 20 s 間の切りくずを加工油と共に採取し、顕微鏡写真を撮って切りくず 100 個の長さを測定してみた。ただし、 $50 \mu\text{m}$ 以下の切りくずは砥粒と見分けが困難であり、測定の対象から除いている。表 3 に示すように、切削速度によって大きな違いはないが、加工油 C の使用によって切りくず長さが短くなっている。

これらの結果より、硫化極圧油には、 FeS の生成によって切りくずの溶着を防ぐだけでなく、切りくずの長さを短くしてその排除を容易にすることにより、溶着型目づまりを防止する働きもあることがわかる。

表 3 切りくず長さ (N 3 砥石, $P_n=200$ kPa)

実験番号	加工油	加工材料	切削速度 $\bar{V}$ (m/min)	測定値 (μm)	
				平均	標準偏差
(1)	C	S 45 C-HH	150	153.3	108.5
(2)	A	S 45 C-HH	150	199.2	106.6
(3)	A	S 45 C-HH	50	192.5	112.6
(4)	A	S 45 C-N	50	206.7	90.1

注) (1) と (2) の平均値の間には非常に有意の差がある。
(2) と (3) の平均値の間には有意の差はない。
(3) と (4) は 95% の信頼度で同一母集団に属さない。

6. 結 言

炭素鋼 S 45 C ホーニング加工の切削速度高速化に伴う切削機構の変化について考察するとともに、高速度加工を可能にする切削方法の改善について具体的に検討した。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) 炭素鋼では切りくずが流れ形となるため、高速度加工になると切りくずの排出が困難となり、目つぶれ切削状態となる。
- (2) 特定の切削速度領域で切りくずの溶着が起り、切削性能が急激に悪化するが、この現象は旋削における構成刃先の成長・消滅現象とよく似ている。
- (3) 多孔性砥石を用いると高速度加工が可能になるが、砥石の損耗が大きく、空孔のため仕上面粗さも粗くなる。
- (4) 硫化極圧油の使用により、試みた切削速度全域にわたって安定した高速度加工が可能となり、切削性能も改善される。
- (5) 硫化極圧油には切りくず長さを短くしてその排除を容易にし、切りくずの溶着を防ぐ働きもある。

最後に、御協力を得た瑞穂研磨砥石(株)、日本グリース(株)、クラウントイシ(株)に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 上田隆司, 山本 明: ホーニング加工の高能率化 (第 2 報), 精密機械, 48, 2 (1982) 155.
- 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) 例えば, 高辻雄三, 能登谷久公, 中崎洋二: 多孔性砥石の研削性能について, 昭和 51 年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1976) 225.
- 4) 山本 明, 上田隆司: ホーニング用処理砥石におけるイオウの働きについて (第 2 報), 精密機械, 43, 9 (1977) 1025.
- 5) 山本 明, 上田隆司: ホーニング用処理砥石におけるイオウの働きについて (第 1 報), 精密機械, 43, 3 (1977) 305.