定切込み型ホーニング加工に関する基礎的研究

(第1報)*

——ホーニング現象の解析——

中川 平三郎** 岡村 健二郎*** 山 根 脩 二†

Study on Feed Expansion Honing(1st Report)
-Analysis of Honing Phenomenon-

Heisaburo Nakagawa, Kenjiro Okamura and Shuji Yamane

This paper describes a process and a phenomenon which were clarified experimentally in feed expansion honing. Feed expansion honing in the case of using conventional abrasive stone, had been considered to have some disadvantageous points, such as higher honing temperature, higher stone wear rate and rougher honed surface of workpiece, comparing with free expansion honing. If superabrasive stone will be used which cut easily and dull slowly, it is surmised that these disadvantages will be eliminated. Furthermore the combination of feed expansion honing and superabrasive stone will bring about higher geometrical accuracy and efficiency. The process of feed expansion honing is made clear by measuring tangential force, stock removal and residual stock, and the result explained that its process is similar to the one of plunge grinding. The higher honing speed can produce the higher honing efficiency and the lower tangential force, when superabrasive stones are used. So it is hoped to develop a new honing machine for high speed honing.

Key words : honing, feed expansion, free expansion, honing speed, superabrasive stone, honing process

1. 緒 言

最近, 精密仕上げ加工としてのホーニング加工の重要性は, 徐々に増していると同時に, ダイヤモンドやCBNの超砥粒が出現してからは, ホーニング加工の分野にも多少なりとも変化が現れている。すなわちホーニング加工といえば, 仕上面粗さがよく, 加工物表面に独特のクロスハッチパターンを残すが, 加工能率は低くて砥石の摩耗が大きい加工で, どちらかといえば, 研削加工後の表面仕上げ加工として捉えられていた。ところが摩耗の少ない, しかも切れ味の安定した超砥粒の砥石が開発されるや, ホーニング加工でも高

い材料除去率が可能になり, 粗加工から仕上げ加工までできるようになった。それに伴って, ホーニング加工機械の砥石拡張方式にも変化がみられ, 従来の油圧による定圧切込み型に対して, 定切込み(強制切込み)型や, 砥石が工作物と接触するまでは定圧拡張で, 削り始めると強制切込みに切り換わる併用型が現れた^{1) ~ 3)}。定圧切込み型ホーニングの利点は, 定切込み型に対して, 仕上面粗さがよく, 工作物の異常発熱と砥石の異常損耗が抑えられることであるが, これらの利点はあくまでも普通砥石を使用した場合である。

ところが切れ味の安定した超砥粒砥石と定切込み型の機械を組み合わせれば, 定切込み型の問題点は解消されて, 長所である前加工の形状不良の修正精度や寸法精度が良く, 加工能率が高いことなどが活かされると考えられる。したがって, 今後は超砥粒砥石の定切込みホーニング加工がますます発展すると思われるがそのホーニング過程や現象については, ほとんど明らかにされていない。

* 原稿受付 平成元年2月9日。昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和61年3月28日)にて発表

** 正会員 鳥取大学教育学部(鳥取市湖山町南4-101)

*** 正会員 中部大学工学部(春日井市松本町1200)

† 正会員 日進製作所(京都府中郡峰山町千歳)

そこで本報告においては、定切込み型ホーニング加工における接線力、寸法生成量、切残し量、表面粗さなど変化を実験的に求めることによって、ホーニング現象を説明する。またホーニング加工速度やクロスハッチ角の加工条件がホーニング現象値に及ぼす影響についても明らかにしようとするものである。

2. 実験方法

ホーニング加工実験には、(株)日進製作所製の円筒内面ホーニング盤を使用した。砥石拡張機構は、ステッピングモータとねじ・ウェッジを用いた強制拡張方式である。また工作物の保持には、専用ジグを用いて回転と上下しないように半固定し、前後左右には自由に動くことのできるフローティングサポート方式を採用した。工作物の材質は、SUJ-2種の焼入れ鋼(内径16.5x長さ30mm、Hv=750)である。ホーニング液には、不水溶性切削液を使用した。

超砥粒砥石を使用する場合、加工前の砥石のツルイグとドレッシングの良し悪しは、すべてのホーニング結果を支配すると言っても過言ではないほど重要である。この作業は難しく安定しないが、ここでは次のような方法でツルイグを行った。まず実際の加工で使うホーンと特殊なジグを用いて、砥石を工作物の仕上がり内径まで拡張させて固定し、これを円筒研削盤で研削する¹⁾⁴⁾。このときの砥石にはGC80/100 L7Vを使用した。ドレッシングは、砥石結合剤がビトリファイドであるので行ななかった。その他のホーニング加工条件は、表1に示す通りである。ただし表中の砥石拡張速度は半径値である。

また砥石にかかる接線抵抗は、ホーン駆動用モータの実効電力を測定して求めた。ホーニング量と切残し量は図1に示す方法で求めた。ここで $Q(t)$ は接線力、

Table 1 Experimental conditions

Honing type	Internal honing Feed expansion Floating support
Honing stone	CBN400M230V WA400JV 4x(2.5x30mm) WA200JV
Workpiece	SUJ 2 ($\phi 16.5 \times 30$ mm, Hv=750)
Honing speed	$V=20-100$ m/min
Feed rate	$\Delta=0.1-0.5$ μ m/st
Cross hatch	$2\alpha=10-30^\circ$
Over travel	$L_o=15$ mm
Honing oil	JIS2-1

Fig.1 Illustration for measuring residual stock

$d(t)$ は砥石拡張量とする。砥石を拡張させると砥石と工作物が t_1 で接触を開始し、接線力が大きくなると共に工作物は徐々に削られていく。 t_{1f} で一旦砥石を急速収縮させて、もう一度 $d_2(t)$ のように砥石を拡張させる。もしも砥石が摩耗しないで、工作物のホーニング量が砥石の拡張量に等しい場合には、砥石と工作物は t_{1f} で接触を開始するはずである。ところが一般には、その時刻よりも前の t_2 で接触を開始する現象が見られる。この時間差すなわち砥石拡張量の差 $d_R(t)$ が、前のホーニングでの切残し量であり、したがって前加工のホーニング量は $S_R(t)$ となる。以上のように、切削抵抗を測定しながら連続してホーニング加工を行うと切残し量とホーニング量が容易に求まる。また砥石摩耗量の測定は砥石直径をマイクロメータで測定して求めた。

3. 実験結果とその検討

3.1 ホーニングサイクルの解析

図2は、砥石拡張速度を粗、精切込みの2段に切り換えたときの、設定砥石拡張量と接線力の変化過程の記録例である。砥石と工作物が接触してから、接線力は変動しながら徐々に増加し、変動成分も次第に大きくなる。その後接線力の平均値と変動量が一定となって、定常ホーニング状態に達する。ここで砥石の拡張速度を遅くすると、接線力は小さくなり、2段目の砥石拡張速度に応じた接線力に落ち着く、その後砥石の拡張を停止させると、接線力は徐々に減少していき変動成分も小さくなるクリーンアップ状態に入る。しかしこの時クリーンアップを長時間行っても、接線力は

Fig.2 Feed expansion honing process

Fig.3 Variation of tangential forces

ゼロとはならずにある値に収束する。したがって、砥石と工作物が完全に離れるまで砥石を収縮させると、はじめて接線力がゼロとなる。また接線力の微小変動はホーニングの往復運動と同期している。このことは、砥石拡張をステッピングモータで行っていることと、砥石がオーバートラベルしたときの砥石と工作物の接触面積が時々刻々と変化するからである。接線力の変化過程から、ホーニング過程を見る限りにおいては、プランジ研削過程と同じであると考えられ、ホーニング過程も、過渡状態、定常状態、クリーンアップ状態からなることがわかる⁵⁾。

3. 1. 1 過渡ホーニング状態

図3は、砥石拡張速度を変えたときの接線力の変化過程を示す。接線力は2本の曲線で囲まれた間を、ホーニング1ストローク毎に変動している。砥石拡張速度を早くするほど、平均接線力と変動成分は大きくなる。しかも、定常ホーニング状態に達するまでの過渡ホーニング時間 t_s は短くなる。

Fig.4 Variation of stock removal

Fig.5 Relationship between transient time and infeed rate

図4は、過渡ホーニング状態における工作物半径の変化量を示す。実験で求めた半径の増加量は、各時点でホーニングを中断して測定した。砥石と工作物が接触し始めた直後の削り代は少なく、砥石拡張量のほとんどが切残し量として蓄積されている。時間と共に工作物が削られる速度は早くなり、定常ホーニング状態に達すると、一定の切残し量を保ちながら削られていく。図中の理論値は、ホーニング過程を一次遅れ系として計算した場合である。

図5は、定常ホーニング状態に達するまでの時間と総ストローク数である。砥石の拡張速度を上げると、より短い時間で定常ホーニング状態に達することがわかる。この傾向は、プランジ研削過程でも確認されており、砥石切り込み量が大きくなると、それだけ早く定常の切り残し量に達するからである⁴⁾。

Fig.6 Relationship between tangential force and infeed rate

Fig.7 Relationship between residual stock and infeed rate

Fig.8 Variation of tangential force in clean-up state

Fig.9 Variation of stock removal

3. 1. 2 定常ホーニング状態

図6は、定常ホーニング状態における平均接線力と変動成分の値を示す。各々の値は砥石拡張速度と比例関係にあることがわかる。普通砥石を使用した場合には、砥石拡張速度やホーニング量に応じて、砥石が目づまりや目つぶれあるいは異常摩耗を起こし、砥石の切れ味が変化して両者は比例関係にない。超砥粒砥石の場合には切れ味が安定しているので、砥石の異常摩耗が起こらない範囲の拡張速度では、ホーニング量と接線力は比例すると考えられる⁶⁾。

図7は、定常ホーニング状態における半径切残し量 $dg(t_s)$ とクリーンアップ後の最終半径切残し量 d_r に及ぼす砥石拡張速度の影響を示す。定常状態における切残し量は、砥石拡張速度が増すほど大きくなる傾向にあるが、その増加割合は徐々に小さくなっている。最終切残し量は、砥石拡張速度に関係無く一定値である。この切残し量は見方を変えると、法線方向の力と

深い関係に有り、切れ味を厳密に議論するにはこの値が有効である⁷⁾。ホーニングにおける切残し量の発生箇所および原因としては次のことが考えられる。砥石の弾性変形、工作物の弾塑性変形、砥石拡張ウェッジ、ねじの弾性変形などである。

3. 1. 3 クリーンアップ状態

クリーンアップ状態でも、プランジ研削過程のスパークアウト状態に似た現象が見受けられる。図8は、クリーンアップ状態における平均接線力の変化過程を示す。定常状態の平均接線力の大きさが異なっても、力が減少する過程は同じであることがわかる。すなわち、図中の実験値と、1次遅れ系の指数関数で表した理論値との間に良い一致がみられる。

図9は、クリーンアップ状態における工作物半径増加量と切残し量の減少過程である。砥石の拡張を止めてもしばらくの間は工作物が削られ、切残し量が減少しているのがわかる。これは、累積した切残し量を少

Fig.10 Effect of honing speed on tangential force

Fig.12 Effect of cross hatch angle on tangential force

Fig.11 Relationship between residual stock and honing speed

しずつ解放しながら、工作物が削られているからである。図8、9より、クリーンアップが完全に終了するまでには、かなり長い時間掛かっていることも判明した。

3. 2 ホーニング加工条件の影響

普通砥石では、切削能率、表面粗さあるいはホーニング抵抗からみて、最適のクロスハッチ角、ホーニング速度が存在することが確認されている⁸⁾。そこで、超砥粒砥石にも最適な値が存在するのかを確かめる意味で、ホーニング速度とクロスハッチ角を変化させる実験を行った結果次のことが明らかになった。

図10は、ホーニング速度を変化させたときの、定常ホーニング状態における平均接線力を示す。この実験ではクロスハッチ角およびホーン1ストローク当たりの砥石拡張量を一定にしているので、ホーン回転速度とストローク速度の比は常に一定である。したがって

ホーニング速度が早くなれば、それに比例して砥石拡張速度も増加している。このことを念頭において平均接線力の変化を見ると、ホーニング速度を上げるほど、平均接線力は小さくて切れ味が良いことがわかる。ここでは、ストローク速度の制限から、ホーニング速度を100m/minまでしか上げられなかったが、図から推察するに、超砥粒砥石を使用する場合には、もっと速度を上げれば、より加工能率を高めることができると考えられる。

図11は、定常およびクリーンアップ状態での切残し量を示す。この切残し量は、砥石法線方向の力と密接な関係にある。すなわち切残し量が増えるほど法線力は大きくなる。図において、切残し量の増加は、ホーニング速度が早くなるほど若干増える傾向にあるが、砥石拡張速度がホーニング速度に比例していることを考えると、速度が早い方が切れ味の良いことがわかる。表面粗さも速度を上げたほうが良好になる結果を得ている。以上の結果から、今後は超砥粒砥石にあわせた、高回転でハイスピードストロークの高速ホーニング盤の開発が望まれる。

図12は、クロスハッチ角を変化させたときの平均接線力を示す。この実験ではホーニング速度と1ストローク当たりの砥石拡張量を一定にしているから、クロスハッチ角が2倍になればストローク速度もほぼ2倍になり、砥石拡張速度もほぼ2倍になる。平均接線力は、クロスハッチ角にほぼ比例しており、普通砥石に見られるような最適のクロスハッチ角が存在する現象は現れていない。

図13は、定常およびクリーンアップ状態における切残し量を示す。定常状態での切残し量は、クロスハッチ角が大きくなるほど多くなる。逆にクリーンアップ

Fig.13 Variation between residual stock and cross hatch angle

状態での切残し量は、クロスハッチ角が大きくなるほど少なくなっている。これはクリーンアップを30sと時間一定の加工を行っているために、クロスハッチ角が大きくなれば、総ストローク数は比例して多くなり、その分クリーンアップが十分に行われるために、累積した切残し量が早く開放されるためと考えられる。定常およびクリーンアップ後の表面粗さは、クロスハッチ角を大きく設定したほうが、多少粗い傾向にある。

以上、ホーニング速度とクロスハッチ角を変化させて平均接線力や切残し量の変化を測定した結果、超砥粒砥石を使って定切込みホーニングを行う場合には、普通砥石を使用したときに見られるような、最適のホーニング速度と角度は認められない。ホーニング速度はより早く、クロスハッチ角も砥石の異常摩耗や表面粗さが低下しない程度に大きく取ったほうが、能率の良いホーニング加工ができると思われる。

4. 結 言

普通砥石を使って強制的に砥石を拡張させる定切込み型ホーニング加工を行うと、砥石切れ味の時間変化が大きく、砥石が異常摩耗したり、工作物が発熱したり、また円筒度がオーバートラベル量の影響を受ける。ところが、ホーニング砥石を超砥粒に替えると、砥石

の切れ味が安定することによって、普通砥石での問題点が減り、超砥粒の長所が現れて、非常に能率の良いホーニング加工ができることが明らかになった。主な結論は次の通りである。

(1) 強制砥石拡張方式の定切込み型ホーニング過程は、プランジ研削過程と同じで、ホーニング1サイクル中に、過渡、定常、クリーンアップの3つの状態が存在する。

(2) 定切込みホーニング加工中には、切残し量が生じる。この切残し量の存在が、抵抗変化や工作物の寸生成過程を決めている。

(3) CBN超砥粒砥石を使うと、高速ホーニング加工が可能になり、能率を高めることができる。ただしこの時にはクロスハッチ角度を一定にするように、ストローク速度も早くしなければならない。

(4) クロスハッチ角度を大きくするほど能率は上がるが、表面粗さの悪化や砥石の摩耗に制限される。

最後に、本研究を進めるに当たりホーニング砥石の提供をいただいた(株)瑞穂研磨砥石に対し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 寺谷忠郎：最近のホーニング加工技術，機械の研究、33、9(1981)1043.
- 2) U.Klink：ホーニングにおけるダイヤモンドおよびCBN，機械と工具、4(1979)89.
- 3) U.Klink：Wirtschaftliches Honen von Getrieberadbohrungen，Werkstatt und Betrieb、116、5(1983)283.
- 4) 去石正宏：ダイヤモンドと石によるホーニング加工について，自動車技術、26、4(1972)453.
- 5) 岡村健二郎，中島利勝，木下輝一：プランジ研削の過渡特性（第1報），精密機械、40、3(1975)256.
- 6) 関西ホーニング研究会：難削材のホーニング加工，機械技術、20、10(1970)104.
- 7) 中川平三郎，岡村健二郎：定切込み型ホーニング加工の基礎的研究（第2報），昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、(1988)345
- 8) 佐々木外喜雄，岡村健二郎：ホーニングの切削機構について，日本機械学会論文集、24、142(1958)372.