ファインセラミックスの定切込み内面ホーニングの研究* (各種ファインセラミックスのホーニング過程)

水谷 秀行^{*1}, 山根 脩二^{*2}
中島 守^{*3}, 岡村 健二郎^{*4}

In-feed Internal Honing of Fine Ceramics (Honing Processes of Various Fine Ceramics)

Hideyuki MIZUTANI, Shuji YAMANE,
Mamoru NAKASHIMA and Kenjiro OKAMURA

The purpose of this study is to improve the machined surface roughness and machining efficiency of fine ceramics by in-feed honing. The results obtained are as follows. The honing force shows a considerable change which corresponds to the difference in the surface generation phenomenon. Transient honing time shows a tendency to decrease as the fracture toughness of the workpiece decreases. In the honing of brittle materials, a very small interference depth between the cutting edge and workpiece makes the work surface have better roughness characteristics. In order to improve the honed surface roughness, in the case of honing with a metal-bonded stick, it is effective that the cutting surface of the honing stick be dressed by a etch method after truing with a diamond wheel grinding.

Key Words: In-feed Honing, Fine Ceramics, Diamond Grain, Metal Bond, Surface Generation Phenomenon, Surface Roughness, Machining Efficiency, Dressing

1. 結 言

機械各部の運動の高速化や高温、腐食環境下での使用およびメンテナンスフリーなどの要求から耐食性、耐摩耗性、耐熱性に優れたファインセラミックスが用いられるようになってきた。しかし、一般にファインセラミックスは、硬脆性材料であるため、加工が困難で、しかも表面性状によって耐摩耗性や材料強度が大きく変化する⁽¹⁾⁽²⁾。そのため機械加工においては表面欠陥の発生を抑え、仕上げ面粗さの向上を図る必要がある。

ところで、ホーニング加工は精密旋削、リーマ加工、研削などにより前加工された表面のさらなる改善を目的として行われるもので、その仕上げ性を利用すれば、ファインセラミックスのような硬脆性材料に対しても高い加工精度を得ることが可能と考えられる。そこで、本研究では、機械部品としての応用範囲の拡大が期待される各種ファインセラミックスの円筒内面に対して、形状精度の修正や寸法制御の点で定圧形に比べて

有利な定切込み形（強制切込み形）ホーニングを適用して、硬脆性材料の仕上げ面粗さと加工能率向上のための基礎的資料を得ることを目的としている。

まず本報告では、各種ファインセラミックスのホーニング過程を加工現象の観点から解析し、材料によるホーニング過程の違いを明らかにするとともに、ホーニング過程に及ぼす加工条件の影響について検討する。また、仕上げ面粗さの改善に有効なツルーイング・ドレッシング方法についても検討する。

2. 実験装置および実験方法

強制切込み形の加工においては、まず、切れ刃と工作物との干渉深さの増加過程で起こる加工現象の変化について調べる必要がある。そこで、ホーニング実験に先だって、微小干渉領域における加工現象の変化をダイヤモンド模型切れ刃による円弧切削実験⁽³⁾⁽⁴⁾によって調べることにした。円弧切削実験条件は次のとおりである。

切削工具：焼結ダイヤモンド（切れ刃ノーズ半径 50 μm, 切れ刃先端頂角 90°, 切れ刃すくい角 -20°）

切削速度：50 m/min（切削回転円直径 200 mm）

切削油剤：なし（乾式切削）

* 原稿受付 1995年6月20日。

^{*1} 正員、中部大学工学部（〒487 春日井市松本町1200）。

^{*2} （株）日進製作所（〒627 京都府中郡峰山町字千歳22）。

^{*3} 正員、愛知技術短期大学（〒443 蒲郡市西迫町馬乗50-2）。

^{*4} 正員・名誉員、中部大学工学部。

Table 1 Characteristics of specimens

Work materials	Al ₂ O ₃	SiC	Si ₃ N ₄	ZrO ₂
Density ρ (g/cm ³)	3.76	2.99	3.21	5.96
Bending strength σ_{ba} (MPa)	322	395	954	925
Fracture toughness K_{Ic} (MPa·m ^{1/2})	3.2	2.2	6.8	7.6
Vickers hardness HV (GPa)	12.6	20.1	13.8	12.6

Table 2 Honing conditions

Honing type	In-feed internal honing
Work support system	Floating support
Honing stone	SD400(120)L50M 4x(2.5mmx2.5mmx30mm)
Honing speed	$V = 40 - 100$ m/min
Infeed rate	$d = 0.05 - 0.35$ μ m/stroke
Cross hatch angle	$2\theta = 5^\circ - 30^\circ$
Over travel	$a = 10$ mm
Honing oil	JIS A 110

ホーニング実験には、強制切込み方式の内面ホーニング盤を使用した。被削材としては表1に示す材料特性のアルミナ (Al₂O₃)、炭化けい素 (SiC)、窒化けい素 (Si₃N₄) およびジルコニア (ZrO₂) を用いた。これらの材料は、例えば破壊じん性値 K_{Ic} についてみると、2.2~7.6 MPa·m^{1/2} と広範囲に変化しており、加工現象に及ぼす材料特性の影響が幅広く検討できるものと考えられる。ホーニング実験では、外径 40 mm、内径 16 mm、長さ 30 mm の円筒中空材料の内面を加工するようにした。ホーニング抵抗の測定は、試料取付台にトルク検出形工具動力計(キスラー Type 9272)を設置し、接線方向抵抗 F_t とホーン軸方向抵抗 F_a を測定した。ホーニング時間経過に伴う砥石切込み量 d (直径拡張量の 1/2) の変化は、ねじ・ウェッジ方式の切込駆動用ステッピングモータへの入力信号をデジタルカウンタで測定し、1パルス当たりの設定切込み量 Δ (1ストローク当たりの直径拡張量の 1/2) との関係より求めた。ホーニング条件は表2に示すとおりである。

ファインセラミックスのホーニング用砥石の結合剤としては、メタルボンドが適するといわれている⁽⁵⁾ ため、実験用ホーニング砥石には、メタルボンドダイヤモンド砥石 SD 400 L 50 M (ただし、図1の結果は#120砥石によるものである)を使用することにした。ホーニング砥石のツルーイング・ドレッシングには、次のような3種類の方法を用いた。すなわち、(1)砥石をホーンに取付け、特殊ジグを介して円筒研削盤に取付け、WA 46 J 7 V 砥石を用いて円筒トラバース研削により、ツルーイングとドレッシングを兼ねて行う方法、(2)ダイヤモンドホイール SD 200 R 100 B によりあらかじめツルーイングを行った後、GC スティッ

Fig. 1 Infeed honing process of fine ceramics

ク砥石により機械的にドレッシングを行う方法、そして、(3)ダイヤモンドホイールによるツルーイング面に対して、今回考案した 40%硝酸水溶液によるボンド腐食法を適用して目出しを行う方法である。

3. 実験結果およびその検討

3・1 定切込み内面ホーニングサイクル 図1は、アルミナファインセラミックスの定切込み形内面ホーニング1サイクル中の接線方向抵抗 F_t とホーン軸方向抵抗 F_a の測定例を示す。 F_t および F_a は、いずれも砥石と工作物との接触開始後、ホーニング時間 t (砥石切込み量 d は t に比例して増加) の経過に伴い徐々に増加し、ある時点で各分力の平均値 $\bar{F}_t$, $\bar{F}_a$ およびそれらの変動幅が一定となり、定常状態に達する。このような状態で砥石の切込みを停止すると、 F_t , F_a はともに切込み停止直後に急な減少傾向を示し、その後徐々に減少しながらある値に収束する。しかし、このときの F_t および F_a は、砥石と工作物との接触開始時の値までは低下しないことから定切込み形ホーニングにおいても研削の場合と同様、限界切残し量が存在することがわかる。このようなホーニング抵抗の変化はプランジ研削過程においてもみることができ⁽⁶⁾、ファインセラミックスの定切込み形ホーニングサイクル中には、過渡、定常、クリーンアップの三つの状態が存在することがわかる。また、図1において、ホーンの往行程と復行程とで F_a の値が非対称になっているこ

と、および F_t の変動幅が相当大きいのは、砥石の切込みがホーン1往復ごとにステッピングモータによって間欠的に行われていることと、オーバートラベルの際の砥石と工作物との接触面積の変化による影響が大きいものと考えられる。

3・2 干渉深さによる加工現象の変化 本研究では、強制切込み形のホーニングを採用しているため、ホーニング現象の基礎的解析に当たって、まず切れ刃と工作物との干渉深さの増加過程で起こる表面生成現象の変化について検討することにした。

図2は、切れ刃と工作物との干渉深さ y_{th} の変化と平均切削背分力 $\bar{P}_c$ との関係を示す。図2より、いずれの材料においても干渉深さの増加過程で、背分力の増加率が急に減少するところがある。このような現象は切削溝の観察から、大規模な割れによる表面生成の開始によって起こっていることが確認された。ファインセラミックスのような硬脆性材料の切削現象の特徴として、割れによる表面生成があげられるが、割れが発生するのに必要な干渉深さは材料によって相当異なる

Fig. 2 Relationship between cutting force and interference depth

Fig. 3 Comparison of honing processes of various fine ceramics

り、こうした表面生成現象の発生過程の違いが切削抵抗の大小に大きく影響しているといえる。

3・3 各種ファインセラミックスのホーニング過程

図3は、ホーニング時間 t の経過に伴う平均接線抵抗 $\bar{F}_t$ の変化を示す。ホーニング状態が定常となる時刻を二点鎖線で示し、そこに至るまでの時間（過渡ホーニング時間） t_s を比較すると、炭化けい素、アルミナ、窒化けい素、ジルコニアの順に長くなっている。過渡ホーニング時間が比較的短い炭化けい素とアルミナにおいては、 $\bar{F}_t$ の増加過程でその増加こう配がいったん減少する特異現象がみられ、定常状態における平均抵抗がジルコニアおよび窒化けい素に比べてかなり小さな値を示している。このような材料によるホーニング抵抗の変化過程の違いは、図2の結果と定性的に対応しており、干渉深さの増加過程で起こる表面生成現象の違いに起因するものと考えられる。すなわち、ファインセラミックスの表面生成現象は、干渉深さの増加とともに、弾性変形→押し込み（空孔の存在する材料の場合）→盛り上がり・クラック発生→大規模割れ発生と変化するが⁷⁾、材料によって、それぞれの領域に到達するのに必要な干渉深さが異なり、ジルコニア、窒化けい素、アルミナ、炭化けい素の順にその値が小さくなる。また、本ホーニング実験では、切込みを強制的に与えているため、切込み量の増加に伴い、各材料とも前述のような現象変化を経て定常状態に達するものと考えられる。したがって、ファインセラミックスの定切込み形ホーニングにおいては、より小さな干渉量で現象変化が起こる材料ほど定常状態に早く達するといえる。

図4は、図3より求めた過渡ホーニング時間 t_s と材料の破壊じん性値 K_{Ic} との関係を示す。両者は比例関係にあり、破壊じん性値が低い材料ほど過渡ホーニ

Fig. 4 Relationship between transient honing time and fracture toughness

ング時間が短縮され、寸法制御の容易な定常状態に早く達する傾向がある。このような結果から、強制的な切込み方式による除去加工においては、表面生成に際して強い脆性挙動を示す材料の方が加工能率の点で有利であると考えられる。

図5は、定常ホーニング状態における平均接線抵抗($\bar{F}_t$)と破壊じん性値 K_{Ic} との関係を示す。図5より、破壊じん性値が高い材料ほど接線抵抗が高くなる傾向にあり、ジルコニアにおいては、炭化けい素やアルミナに比べて4倍以上の著しく高い値を示しており、材料特性の違いがホーニング抵抗に大きく影響していることがわかる。

3・4 ホーニング仕上げ面の解析 図6は、炭化けい素とジルコニアのホーニング仕上げ面を三次元的に測定し、比較したものである。図6(b)のジルコニアのホーニング面には切削方向の条痕が認められ、明らかに延性的な表面生成が関与しているが、図6(a)の炭化けい素のホーニング面は、微小な割れによる表面生成が支配的である。両者の表面生成現象の特徴は、本質的には研削の場合⁽⁴⁾と変わらないが、仕上げ面粗さ R_{max} を求めて比較すると、図7に示すとおりであり、研削の場合⁽⁴⁾に仕上げ面粗さが悪かった炭化けい素が、 R_{max} が最も小さな値となっている。これは、本

実験では砥石の切込みを1ストローク当たり $0.05 \mu\text{m}$ とかなり小さくしていることと、図3の結果より、炭化けい素は他の材料に比べて、定常状態において切込み量の累積が少ない状態で加工が進行しているためと考えられる。すなわち、破壊じん性値の低い材料ほどより小さな切込み量で加工現象の変化が起こり、定常状態にも早く到達する。このため、定常状態における除去単位が小さくなり、その結果、仕上げ面粗さが向上したものと考えられる。このように除去単位を小さくすることにより、破壊じん性値が低く、割れによる表面生成が支配的な材料に対しても、仕上げ面粗さをかなり小さくすることが可能である。

3・5 ツルーイング・ドレッシング方法の検討 前述の実験では、ホーニング砥石のツルーイングおよびドレッシングには、作業が比較的簡単なWA 46 J 7 V 砥石による研削法を用いている。しかし、仕上げ面粗さのさらなる向上のためには、他のツルーイング・ドレッシング法についても検討する必要がある。

Fig. 5 Relationship between steady honing force and fracture toughness

(a) SiC (b) ZrO₂

Fig. 6 Comparison of honed surfaces

Fig. 7 Surface roughness of various fine ceramics

Fig. 8 Change of cutting surface of honing stick with truing and dressing method

Fig. 9 Change of surface roughness with truing and dressing method

そこで、第2章で述べた3種類のツルージング・ドレッシング法による砥石作用面の比較を図8に示す。左は砥石作用面(長手方向)の断面プロフィールで、触針式表面粗さ測定器により直接測定したものである。また、右の写真は砥石作用面の金属顕微鏡写真である。図8(a)は、WA 46 J 7 V 砥石によるツルージング・ドレッシング面を、また図8(b)はダイヤモンドホイール SD 200 R 100 B によるツルージング面を示す。図8(b)では、切れ刃の突出しはほとんどみられないが、真直度の高い表面が得られている。この砥石面に対して2とおりの方法でドレッシングを行い比較した。まず、図8(c)はGC #220 スティック砥石による機械的方法、図8(d)は今回考案した40%硝酸水溶液による腐食法のドレッシング面である。切れ刃突出し量はいずれも約10 μmとした。図8(d)の腐食法では腐食液の塗布回数によって切れ刃突出し量を任意に設定することができ、また機械的な力が加わらないため、砥粒切れ刃を脱落させることなく、切れ刃先端高さが一様にそろった砥石作用面を得ることができる。

図9は、炭化けい素のホーニング仕上げ面粗さ R_{max} を、ツルージング・ドレッシング法の違いにより比較したものである。WA 砥石によるツルージングの場合に比べて、ダイヤモンド砥石でツルージングしたものを用いると仕上げ面粗さが小さくなる。特に腐食法によってドレッシングを行った砥石を用いた場合には、仕上げ面粗さの大幅な向上がみられた。

3・6 ホーニング過程に及ぼす加工条件の影響

腐食法によりドレッシングを行った砥石を用いて、アルミナセラミックスのホーニングを行い、過渡ホーニング時間 t_s 、定常状態における平均ホーニング抵抗(切削方向抵抗) $(\bar{F}_c)_s$ 、ホーニング仕上げ面粗さ R_{max}

(a) Relationship between transient honing time and honing conditions

(b) Relationship between steady honing force and honing conditions

(c) Relationship between surface roughness and honing conditions

Fig. 10 Influence of honing conditions on honing performance

に及ぼすホーニング条件、すなわち、切込み量 Δ 、クロスハッチ角 2θ 、ホーニング速度 V の影響を調べた結果を図10に示す。ここでホーニング抵抗(切削方向抵抗) $(\bar{F}_c)_s$ は、接線方向抵抗 $(\bar{F}_t)_s$ と軸方向抵抗 $(\bar{F}_a)_s$ の測定結果をもとに、

$$(\bar{F}_c)_s = \sqrt{(\bar{F}_t)_s^2 + (\bar{F}_a)_s^2}$$

により算出した。まず、図10(a)より、過渡ホーニング時間 t_s は、 Δ , 2θ , V のいずれの増加によっても減少するため、寸法制御の容易な定常状態に早く到達させるためには、各要因の値を大きく設定する必要がある。しかし、図10(b)より、ホーニング抵抗は1ストローク当たりの切込み量 Δ の増加によって大きく増大するため、これに対応して機械の剛性や駆動系のパワーアップを検討する必要があるため、実用上は、クロスハッチ角 2θ またはホーニング速度 V を増大させて、加工能率の向上を図ることが望ましい。一方、

アルミナセラミックスのホーニング仕上げ面粗さは、図 10(c)に示すように、 Δ , 2θ , V によってほとんど変化がみられなかった。

4. 結 言

以上のように、各種ファインセラミックスに定切込み形ホーニングを適用して、そのホーニング過程を実験的に検討した結果、次のようなことが明らかになった。

(1) ホーニング抵抗は表面生成現象の違いによって大きく変化する。

(2) 破壊じん性値が低く、割れによる表面生成が支配的な材料ほど、寸法制御の容易な定常状態に早く達し、定常状態における平均ホーニング抵抗も低くなる。

(3) 除去単位を小さくすることにより、脆性挙動の強い炭化けい素においても仕上げ面粗さを相当小さくすることができる。

(4) 仕上げ面粗さ向上のためには、砥石作用面上の切れ刃先端高さをできるだけそろえたうえで、メタルボンド砥石の場合には、腐食法によりドレッシングを行うことが有効である。

(5) アルミナファインセラミックスのホーニング実験より、1 ストローク当たりの切込み量の増加は、ホーニング抵抗の大幅な増大をもたらすため、加工能率向上のためには、クロスハッチ角またはホーニング

速度を増加させて単位時間当たりのストローク回数を増やし、相対的に時間当たりの切込み量を増大させるほうがよい。

終わりに、各種ファインセラミックス試料をご提供いただいた日本ガイシ(株)ならびにダイヤモンド砥石をご提供いただいた大阪ダイヤモンド工業(株)に対して深甚の謝意を表する。また、供試試料の特性試験に便宜をはかっていただいた(財)ファインセラミックスセンター坂井田喜久氏に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 林聡哉・稲崎一郎・佐藤純一、ダイヤモンド砥石による炭化けい素の研削加工(研削条件が加工物品質に及ぼす影響)、機論, 51-467, C(1985), 1864-1869.
- (2) 由井明紀・北住順一・渡部武弘・吉田嘉太郎、研削条件がセラミックスの強度に及ぼす影響、機論, 57-537, C(1991), 1743-1748.
- (3) 岡村健二郎・中島利勝・山本紀一郎、砥粒切れ刃による切削現象の研究(第5報) 円弧形切削実験による微小切削現象の考察、精密機械, 33-4(1967), 237-244.
- (4) 岡村健二郎・水谷秀行・古久保浩・田宮博道、ファインセラミックスの研削仕上げ面生成過程、精密工学会誌, 58-2(1992), 301-306.
- (5) 上田隆司・花見真司・平野聡・山本明、ファインセラミックスのホーニング加工 ダイヤモンド砥石の結合剤が切削性能に及ぼす影響、精密機械, 51-6(1985), 1195-1200.
- (6) 岡村健二郎・中島利勝、研削の過渡特性(第1報) かつぎ現象の解明、精密機械, 38-7(1972), 580-585.
- (7) 岡村健二郎・中川平三郎・金東燮、ファインセラミックスの機械加工に関する基礎研究(第1報) 過渡的切削過程における表面生成機構一、精密機械, 51-10(1985), 1946-1952.