

# マシニングセンタによるセラミックの高効率研削加工

Grinding of Ceramics by Machining Center

鈴木 清\*・植松 哲太郎\*\*・中川 威雄\*  
Kiyoshi SUZUKI, Tetsutaro UEMATSU and Takeo NAKAGAWA

## 1. はじめに

ファインセラミックスを用いる機械部品では、その製造コストの大半を研削加工が占めている。これは加工の困難さに起因するものであるが、ファインセラミックスに対する需要が急増していることを考えると、効率的な加工技術の開発は極めて重要である。従来、ファインセラミックスの最終工程である研削加工では、ダイヤモンド砥石が用いられてきた。既存の砥石は砥粒保持力が不十分のため加工能率は極めて低いものとなっていた。一方、著者らの一人らが数年前に開発した鑄鉄ボンドダイヤモンド砥石<sup>1)</sup>は、高強度、高研削比等の特性を有し、硬脆材料の研削に対しても有効であることが確認されている<sup>2)</sup>。しかし、従来の研削盤では剛性その他の点でこの砥石の能力を十分に引き出すことができなかった。そこで著者らは、マシニングセンタに着目し、その高剛性、NC機能等を活用することにより、ファインセラミックスの新しい高効率研削加工技術を開発することを目指した。

## 2. マシニングセンタによる研削加工の得失

ファインセラミックスの高効率研削加工機械に要求される性能は、第一に主軸系を中心とする機械各部の動剛性である。他にも駆動部精度や主軸回転数の高いこと、さらに各種形状の加工が可能なが要求される。現存の工作機械の中ではマシニングセンタがこれらの要求を最も満たしているといえよう。マシニングセンタを研削加工に使用した場合の得失を挙げれば表1のようになる。NC機能の活用により、2次元および3次元形状の研削や砥石の交換のみならず、インプロセスでのドレッシングやツールイングも適当な周辺装置との組み合わせで容易に実現できる。

## 3. マシニングセンタによる硬脆材料の研削実験

### 3.1 使用砥石および被削材

鑄鉄ボンドダイヤモンド砥石は、ダイヤモンド砥粒を鑄鉄粉およびカーボニル鉄粉と混合、圧縮成形後に焼結

して作られる<sup>1)</sup>。マトリックスとして使われている鑄鉄母地は砥石に高い強度と強力な砥粒保持力を与えるため、その研削比は極めて高いものとなる。研削実験は、表2に示す諸元を持つ鑄鉄ボンドダイヤモンド砥石(富士ダイス製)を立て型マシニングセンタ(日平トヤマ製 TMC-40V, 3.7kw)に取り付けて行った。

写真1はツールマガジンに取り付けられた砥石群である。実験には主として各種のセラミックス(アルミナセラミックス、炭化珪素、窒化珪素)を用いたが、金属の中では一番の難加工材といわれている超硬合金も使用した。

削り代の大きい重研削技術を確立する意味で、種々寸法のブロック形状被削材から複雑形状を削り出す方法(クリープフィード研削)をとった。冷却は水溶性研削液(ジョンソンワックス, JC707, 50倍希釈液)によった。

### 3.2 研削実験結果

#### 3.2.1 砥石の研削能力の確認

表1 マシニングセンタによる研削加工の得失

| 得                | 失 | マシニングセンタの機能    |
|------------------|---|----------------|
| ○経済性             |   | (専用研削盤の代替)     |
| ○輪郭研削(二、三次元)     |   | NC機能           |
| ○重研削加工           |   | 機械剛性:大         |
| ○クリープフィード研削      |   | 主軸剛性:大、低速送り:可能 |
| ○複雑加工←砥石の選択      |   | ツールマガジン        |
| ○ツールイング、ドレッシング容易 |   | NC機能+各種ドレッサ    |
| ○ワーク交換容易         |   | パレット交換         |
| ●研削屑対策の不備        |   | スライド面&研削液装置未保護 |
| ●経済性             |   | (仕事量との関係)      |

表2 使用鑄鉄ボンドダイヤモンド砥石

| 番号 | 名称     | 直径   | 幅    | 粒度  |
|----|--------|------|------|-----|
| 1  | 軸付     | 20mm | 20mm | 140 |
| 2  | 軸付(5R) | 20   | 20   | 140 |
| 3  | カップ    | 75   | 13   | 120 |
| 4  | カップ    | 75   | 13   | 300 |
| 5  | セグメント  | 75   | 5.5  | 140 |
| 6  | セグメント  | 75   | 5.5  | 400 |
| 7  | ストレート  | 150  | 7.0  | 140 |
| 8  | リング溝用  | 32   | 0.5  | 120 |

注1) 砥石集中度は全て125

注2) NO.5.6.8による研削データは明示せず

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

\*\* 富山県立技術短期大学

最初に、本研究で意図しているような高効率研削加工法が基本的に可能であるか否かを確認する予備実験を行った。被削材としてセラミックスおよび超硬合金の切削用スローアウェイチップあるいはロー付け用チップを用い、カップ砥石による平面研削および軸付砥石による側面研削を試みた。表3に代表的な研削結果を示す。

一連の予備実験から、相当大きい研削幅、切り込み、送り速度を採用することができ、かなりの研削量が得られること、また研削速度が通常の研削加工法に比べて非常に低いにもかかわらず、特に問題なく研削できること、砥石の強度、切れ味、寿命もさほど心配のないこと、砥石の摩耗が十分に小さく、高い研削比が期待できること、過大負荷や振動の問題も生じないこと、アップカットとダウンカットの差異が別れないこと等がわかり、この時点ではマシニングセンタを使用することによる問題点は何等認められなかった。

3.2.2 アルミナセラミックスの複雑加工

次に、セラミックスのなかでは一般的なアルミナセラミックスのブロック (82.3×100×141 mm) に対してクリープフィード研削を試みた。種々の加工の可能性をみるため、平面、段差、直線溝、円弧段差等の直線送り研削、凸および凹形円弧のNC輪郭研削、円形溝、楕円溝等のNC研削加工を実施した。写真2は加工品の一例であり、図1および表4はこの加工品の代表的な各部に対する使用砥石と研削条件を示したものである。単位時間当たり研削量(Q)で見ると、ストレート砥石で440 mm<sup>3</sup>/

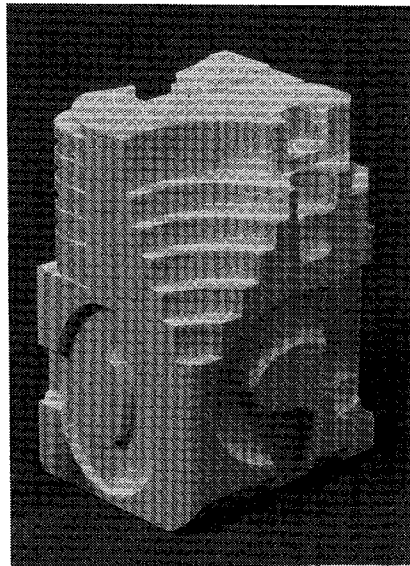


写真2 MCによるアルミナセラミックスの研削加工品

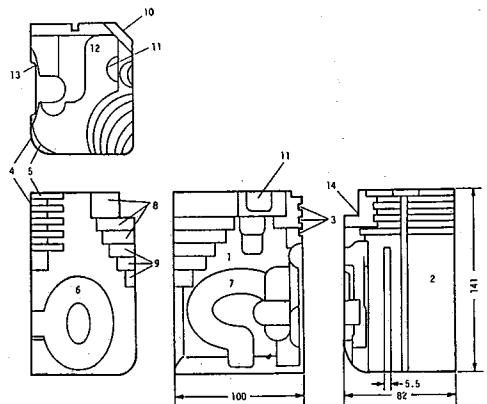


図1 写真2の加工品の主要加工部

表4 マシニングセンタによるアルミナセラミックスの研削データ一覧表

| 研削箇所  | 砥石形状&粒度        | N r p | 切込み               | 幅                | 送り*   | 備考             |
|-------|----------------|-------|-------------------|------------------|-------|----------------|
| ①平面   | カップ(D=75) #300 | 2000  | 0.5 <sup>mm</sup> | 35 <sup>mm</sup> | 12.0* | 2パス            |
| ②平面   | カップ(D=75) #140 | 2500  | 0.5               | 75               | 8.0   | 1パス            |
| ③直線溝  | ストレート #140     | 1000  | 4.0               | 5.5              | 20.0  |                |
| ④凸R溝  | ストレート #140     | 1000  | 8.4Max            | 5.5              | 50.0  | 実質送り=10mm, R21 |
| ⑤凸R溝  | ストレート #140     | 1000  | 5.0               | 5.5              | 75.0  | 実質送り=8mm, R16  |
| ⑥楕円溝  | 軸付(底R) #120    | 3300  | 5.0               | 20.0             | 2.5   | 2A=52, 2B=36*  |
| ⑦半楕円溝 | 軸付(底R) #120    | 3000  | 6.0               | 20.0             | 2.5   | 2A=60, 2B=44** |
| ⑧円弧段差 | カップ(D=75) #100 | 2000  | 5.0               | 45               | 1.0   | R=37.5, 縦送り    |
| ⑨円弧段差 | カップ(D=75) #120 | 2000  | 5.0               | 30               | 1.5   | R=37.5, 縦送り    |
| ⑩傾斜面  | 軸付(D=20) #120  | 3000  | 7.0               | 2.5              | 2.5   | 傾斜角=45°        |
| ⑪半円溝  | 軸付(底D) #120    | 3000  | 15.0              | 20.0             | 3.0   |                |
| ⑫凸R面  | 軸付(D=20) #120  | 3000  | 4.0               | 4.5              | 2.5   | R=10, NC       |
| ⑬凹R面  | ストレート #140     | 1000  | 5.0               | 5.5              | 5.0   | R=75, 砥石Rの転写   |
| ⑭段差面  | カップ(D=75) #120 | 2000  | 1.0               | 11.7             | 60.0  |                |

注) \*, \*\*は楕円長径および短径 (但し、工具中心軌跡) + 送り: mm/min

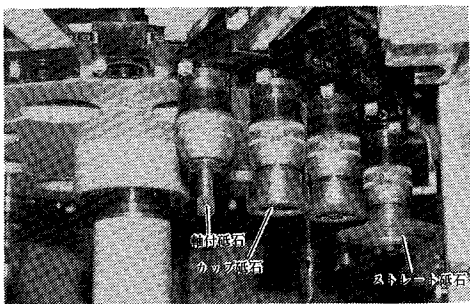


写真1 ツールマガジンに取り付けられた砥石群

表3 小試験片による予備研削実験結果

| 加工形態   | 側面研削-1                  | 側面研削-2      | 平面研削-1          | 平面研削-2      |
|--------|-------------------------|-------------|-----------------|-------------|
| 被加工材   | 超硬合金                    | 窒化硅素 (NTK製) | 窒化硅素 SNGA431 TN | アルミナ SN43-5 |
| 砥石     | 軸付砥石                    | 軸付砥石        | カップ砥石           | カップ砥石       |
| 寸法、粒度  | D=20, #140              | D=20, #140  | D=75, #300      | D=75, #300  |
| 回転数: N | 3000rpm                 | 3000        | 3000            | 3000        |
| 速度: V  | 188m/min                | 188         | 716             | 716         |
| 送り: F  | 20mm/min                | 20          | 20              | 40          |
| 切込み: Z | 1.5mm                   | 1.0         | 2.5             | 2.0         |
| 研削幅: W | 10mm                    | 10          | 9.6             | 9.6         |
| 研削量: Q | 300mm <sup>3</sup> /min | 200         | 480             | 768         |

研究速報



写真3 炭化珪素の研削加工品

min(加工部③), カップ砥石で700 mm<sup>3</sup>/min(加工部④), 軸付砥石で900 mm<sup>3</sup>/min(加工部⑤)を実現している。

粒度300番のカップ砥石による平面の仕上げ面粗さは0.8-1.0 μm(加工部①)であった。炭化珪素ブロック(20×83×83 mm)に対しても同様に段差, 円弧溝等の加工を実施し, 高い加工能率を得た(写真3)。本報では加工能力の限界を見極める段階にはないが, それでも本研究で提唱した研削方式が十分なる加工能力を秘めていることが写真2および写真3の加工品から伺えよう。

これらのセラミックスおよび後述の超硬合金の研削を通じて, 冷却液の影響は極めて大きかった。加工部位に高圧の冷却液を大量に常時供給して砥石の冷却と研削屑の除去を行う必要がある, これを怠ると発熱, 発煙, 研削抵抗の急増をみて, 場合によっては砥石の劣化または被削材の破損を招いた。

3.2.3 窒化珪素セラミックスの三次元輪郭研削

マシニングセンタのNC機能と鑄鉄ボンダイヤモンド砥石の研削能力を最も効果的に発揮させる例として, 窒化珪素の3次元クリープフィード研削を行った。写真4は60×60×15 mmの窒化珪素ブロックからR付軸付き砥石を用いて削り出した靴形加工品である。工具砥石は, 自動プログラミングされた2-1/2軸制御のNCプログラムにしたがって, 図2に示す経路を1パスで通過して加工を行った。Z軸方向のピックフィードは1 mm, 工具中心送り速度は20 mm/minであるが, 削り代の大きい円弧部分(最大約10 mm)は遅く(10 mm/

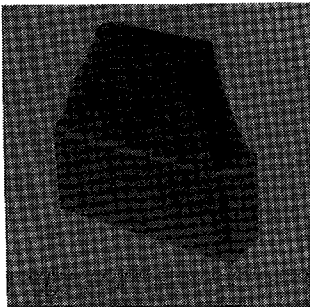


写真4 窒化珪素のNC 3次元輪郭研削例

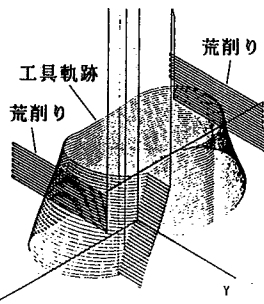


図2 3次元研削品の工具中心軌跡

min), 削り代の小さい直線部分では速い送り速度(35 mm/min)をオーバライド機能により選択した。加工時間は両肩部の荒取りを含め約8時間であった。

3.2.4 超硬合金の高速および鏡面研削

加工能率向上のための高速重研削加工が必要な点では超硬合金材料も前述のセラミックス材と変わらないが, 超硬合金材料では, 金型を始めとする種々の応用分野で, 鏡面研削加工を必要とすることも多い。そこで, 超硬合金ブロックの側面(研削幅: 15 mm, 研削長さ: 60 mm)に対してカップ砥石による高速および鏡面研削加工を試みた。表5に研削条件と単位時間当たり除去量, 被研削面粗さ等の研削結果を示す。図3は切り込み0.1 mm, 研削速度165 m/minのときの送り速度と面粗さの関係(表5のデータ③, ④, ⑤)を示している。これらの図表からわかるように, 被削面粗さは送り速度とともに減少し, 粒度#120という比較的粗い砥石であるにもかかわらず送り速度が十分小さい30 mm/min以下(データ③, ④)ではR<sub>max</sub> 0.1 μm程度の良好な鏡面が得られた。鏡面加工品の例を写真5に示す。切り込みを小さくすれば送り速度は大きく取ることができ, 切り込み0.02 mmでは250 mm/minの高速送り研削も達成できた(データ⑩)。このときの面粗さはR<sub>max</sub> 0.9 μmであった。データ⑧⑨のように面粗さを多少犠牲(R<sub>max</sub>=1 μm強)にすれば, 切り込みと送りの適当な組み合わせにより比較的高い除去量(135 mm<sup>3</sup>/min)の達成も可能であった。

3.2.5 超硬合金のNCクリープフィード研削

超硬合金部材の優れた耐磨耗性に着目して, 金型や機械部品に利用しているケースは多い。3次元形状の超硬合金部材の粗加工の段階は, 現在では電解研削などに頼っている。この粗加工の段階を本研究の方式に置き換えることができれば, 前項の高速(鏡面)仕上げ研削加工

表5 カップ砥石による超硬合金の研削加工結果

|   | 回転数(V)    | 切込   | 送り  | 除去体積                   | 主軸動力   | 粗さ(L/C)*  |
|---|-----------|------|-----|------------------------|--------|-----------|
| ① | 700, 165  | 0.40 | 10  | 60mm <sup>3</sup> /min | 0.83kw | 0.25μm    |
| ② | 700, 165  | 1.00 | 10  | 50.0                   | 0.90   | 0.17      |
| ③ | 700, 165  | 0.10 | 10  | 15.0                   | 0.55   | 0.05/0.05 |
| ④ | 700, 165  | 0.10 | 30  | 45.0                   | 0.64   | 0.13/0.09 |
| ⑤ | 1500, 165 | 0.10 | 50  | 75.0                   | 0.69   | 0.29/0.23 |
| ⑥ | 1500, 353 | 0.10 | 100 | 150.0                  | 1.41   | 0.38/0.39 |
| ⑦ | 1500, 353 | 0.05 | 150 | 112.5                  | 2.29   | 0.7       |
| ⑧ | 1500, 353 | 0.06 | 150 | 135.0                  | 1.59   | 1.2       |
| ⑨ | 1500, 353 | 0.06 | 150 | 37.5                   | 1.85   | 1.4       |
| ⑩ | 2000, 471 | 0.05 | 50  | 37.5                   | 1.63   | ⑪の前加工     |
| ⑪ | 2000, 471 | 0.02 | 250 | 75.0                   | 1.78   | 0.9       |

注1) 使用砥石: φ75mmカップ砥石(粒度130,集中度125,溝付き)  
 注2) 被加工物: 超硬合金60×60×15mm, ②の研削幅のみ5mm, 他は全て15mm  
 注3) 主軸動力: 空転時の動力を含む  
 注4) 単位: 切込み(mm), 送り(mm/min)  
 注5) 粗さは3箇所平均R<sub>max</sub>(L: 送り方向, C: 直角方向の粗さ)

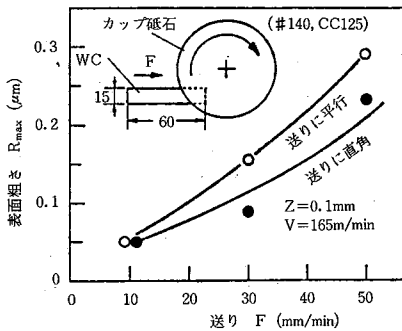


図3 超硬合金の研削における送りと仕上げ面粗さの関係(カップ砥石)

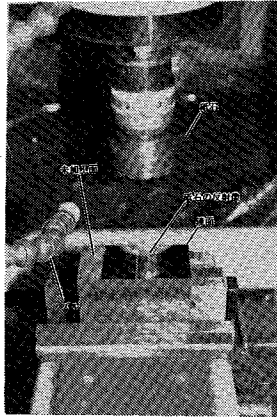


写真5 超硬合金材料の鏡面研削例

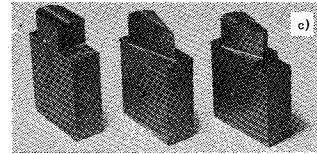
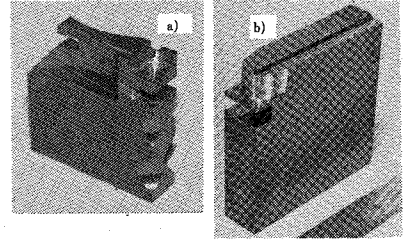


写真6 超硬合金材料のクリープフィード研削加工品

と組み合わせることにより、同一のマシニングセンタ上で超硬合金部品の一貫加工が可能になる。

写真6は超硬合金ブロックに各種形状のNCクリープフィード研削を施して得られた加工品である。写真6(a), (b)は60×60×15mmの超硬合金ブロックにセラミックスの場合と同様な段差加工、直線、曲線および円弧溝加工、凸または凹状円弧輪郭加工等を実施したものである。この場合もセラミックスと同様に高効率研削が可能であった。また良好な寸法精度および面粗さも得られたが、これは後行程の精密仕上げ工程の短縮に結び付く。

写真6(c)は比較的小さい超硬合金ブロック(6×15×21, 6×9×33mm)の端部に直線および円弧等の輪郭加工を施したものである。写真に示す程度の形状の場合は加工時間も約10分と短く、プレス用パンチ等に簡単に応用できる可能性がある。

4. 本加工法の問題点および対策

上述の各種研削実験により、本研究の研削方式が硬脆材料の加工に対して期待の持てることがわかった。しかし実験の過程で種々の問題点あるいは解決すべき課題も浮き彫りにされた。第1の問題点は微細な研削屑による装置摺動面の異常摩耗であるが、これは適当なる防塵カバーを採用することで対処できよう。砥石についていえば、マシニングセンタによる研削加工では当然無人化が達成されねばならないが、それには砥石が長期にわたって良好な切れ味を持続することが前提となる。鑄鉄ボンダイヤモンド砥石では切れ刃の自生作用がそれほど期

待できないため、研削中にインプロセスでドレッシングする方式の採用が必要と考えられる。本研究で目指す重研削あるいは高速研削では研削熱の発生が著しいため、高圧の研削液を多量にしかも効果的に噴射する方法も検討項目の一つである。さらに、この新しい研削方式に関して加工データを蓄積することにより高効率研削を達成するための指標を作成するとともに、研削負荷を検出して加工条件を変更するなどの適応制御研削システムを構成することも有効と考えられる。

5. おわりに

鑄鉄ボンダイヤモンド砥石の発展をはかる目的で、マシニングセンタの持つ優れた特性(高剛性、高送り精度、NC機能等)に着目し、新たな研削加工技術の提唱を行った。各種硬脆材料を用いた研削実験の結果、予期した以上の研削性能が得られ、セラミックス等の高能率研削への端緒を見いだすことができた。この研削技術には、まだまだ解決すべき問題も多いが、近い将来マシニングセンタによる研削加工が現実のものとなることを期待したい。おわりに、本研究を遂行するに当たり御協力頂いた各社(日本特殊陶業、京セラ、YKK、富士ダイス、牧野フライス)並びに実験に御協力頂いた富山県立技術短大機械工場の諸氏および下田勉、吉田政弘、吉田昌生の学生諸君に厚くお礼申し上げます。(1985年9月13日受理)

参考文献

1) 萩生田, 刈込, 中川: 昭55精機秋講演論集, P692  
 2) T. NAKAGAWA, et al: Proc. of 5th ICPE (1984) 369