

電着 CBN ホイールによる合金工具鋼の 高精度・高能率ジグ研削の研究* (研削特性値に及ぼす研削条件の影響)

峠 睦*¹, 坂本博宣*², 松尾哲夫*¹

Jig Grinding of Alloy Tool Steel with Electrodeposited CBN Wheels (Effects of Grinding Conditions on Grinding Characteristics)

Mutsumi TOUGE, Hironobu SAKAMOTO and Tetsuo MATSUO

Jig grinding is well known as a precision internal machining process for high precision products such as dies and fixtures. Investigation to realize high productivity and high accuracy is performed with different electrodeposited CBN wheels under various grinding conditions. Grinding characteristics such as grinding forces, torque and surface roughness were measured. The main results obtained are as follows. (1) Grinding accuracy improved with an increase in peripheral speed of grinding wheel. (2) Grinding forces and torque decrease with an increase in peripheral speed of wheel but increase with wheel depth of cut and work feed rate. (3) Grinding forces and torque increase with the cumulative stock removal which is caused by the progress of attritional wear of CBN abrasive grains. (4) A clear reduction of grinding forces is caused by quill motion overlapping the main axis and is induced by the decrease in the mean chip volume and/or the mean chip cross-sectional area.

Key Words: Internal Grinding, Grinding Force, Torque, Electrodeposited CBN Wheel, Die, Surface Roughness, Tool Wear, Quill Motion

1. 緒 言

電子・機械部品の高品質化に伴い、NC ジグ研削は複雑な形状をした金型、治工具の高精度仕上げ加工に不可欠な加工技術となっている⁽¹⁾。本研削法が穴内面の仕上げ加工に適用される場合、小径砥石が多く用いられている。しかし、本研削法特有な問題点として、小径砥石を使用するため砥石軸系の剛性が低い、アルミナや炭化ケイ素系の在来砥石では砥石摩耗が早いために研削特性が不安定になりやすい⁽²⁾⁽³⁾、砥石と工作物との接触弧長さが長いこと⁽⁴⁾などが指摘されている。そのため、最近では CBN やダイヤモンドホイールが用いられているが、これらの問題はまだ十分に解決されていない。したがって、現場の生産ラインでは加工能率を犠牲にしなから、ある程度軽い研削条件のもとで加工し、精度のみを確保しているのが実状である⁽¹⁾。以上のように、内面研削は多くの未解決の課題を擁しているにもかかわらず、その研削機構や研削現象を解明するための系統だった

研究、特にダイヤモンドや CBN ホイールを用いた内面研削の研究報告は極めて少ない⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

そこで本研究においては、合金工具鋼 SKD 11 を電着 CBN ホイールを用いて NC ジグ研削盤による内面研削実験を行い、研削抵抗、トルク、砥粒逃げ面摩耗面積率、仕上げ面粗さなどを研削条件や累積研削量を変化させて測定した。また、NC ジグ研削独特の主軸のクイル運動(Z 軸チョッピング⁽⁷⁾)に注目し、研削抵抗および仕上げ面粗さに及ぼすクイル運動の効果や研削機構について調べた。

2. 実験方法

本研究には NC ジグ研削盤を使用した。加工方式は図 1 に示すように砥石が被削材の輪郭または加工経路に対して法線方向に切込む輪郭制御方式とした。図 1 において、砥石軸は加工経路上に設定されている C 軸から砥石半径に一致する距離だけ偏心しており、偏心方向は加工経路に対して常に直角方向を向くように自動制御されている。このため、本方式は加工経路が急激に変化する場所でも砥石中心が通る経路(工具径補正)を考慮したプログラムが必要でなく、複雑な形状を有する加工面でも容易に加工できる利点がある。

研削条件を表 1 に示す。被削材は金型材料として最

* 原稿受付 平成 5 年 7 月 21 日。

*¹ 正員、熊本大学工学部 (☎860 熊本市黒髪 2-39-1)。

*² 正員、熊本県工業技術センター (☎862 熊本市東町 3-11-38)。

表 1 研削条件

Workpiece	SKD11 (Hv 800)
Grinding wheel	Electrodeposited CBN
Diameter of wheel (mm)	φ12
Grain size number	80, 120, 170, 200, 300
Depth of cut t (μm)	20, 50, 100, 150, 200
Work feed rate V_w (mm/min)	10 - 50
Wheel speed V_s (m/s)	10 - 27.5
Quill speed V_q (m/min)	1 - 5
Diameter of wheel spindle (mm)	10
Length of wheel overhang (mm)	40
Grinding fluid	Soluble type (3 l/min)

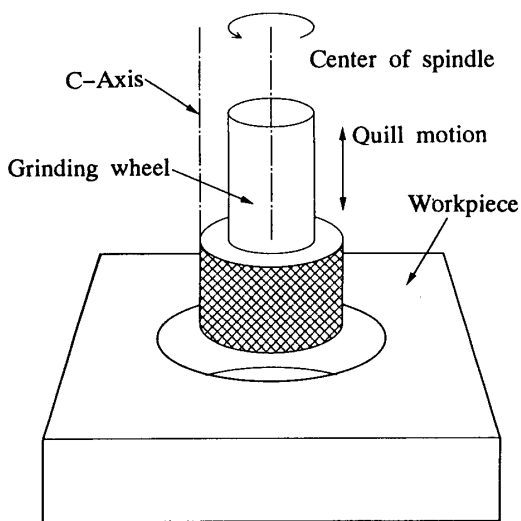


図 1 ジグ研削実験の原理図

も広く用いられている冷間金型用合金工具鋼 SKD 11 であり、直線加工の場合は厚さ 8 mm、長さ 50 mm の板材、また丸穴加工の場合は前もってジグボアで直径 17.8 mm の穴を開けた厚さ 20 mm の板材を使用した。また、研削抵抗、仕上げ面粗さおよび真円度に及ぼす研削条件の影響を調べる実験では新品のホイールを使用し、研削中の砥粒摩耗の進行をできるだけ避けるため、厚さ 8 mm、長さ 10 mm の板材を使用した。なお、この試料を用いて得られた実験結果には新品のホイールを使用したことを示すため、図 1 中に $Z=40 \text{ mm}^3$ (Z : 累積研削量) と表示した。被削材は 1320 K にて真空中 1 hr 保持後油焼入れし、その後 850 K で二回焼戻しを施して実験に供した。使用した砥石は粒度 80~300 の電着 CBN ホイールであり、ホイール形状は直径 12 mm、突出し量 40 mm、軸径 10 mm である。

研削抵抗は防水処理を施した二分力測定可能な粋組形動力計を用い、またトルクは薄肉円環を利用した動力計によりそれぞれ測定した。研削過程での砥粒逃げ面摩耗面積率は砥石作業面と被削材との間に市販のア

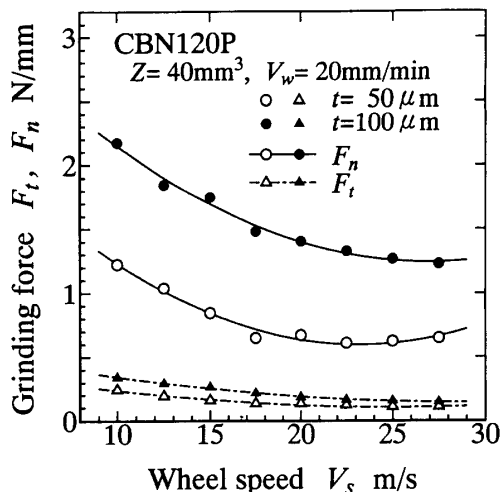


図 2 研削抵抗に及ぼすホイール周速の影響

ルミニウムはく(厚さ 15 μm)をはさみ込み、7 N/mm²の荷重をかけて転写し、測定した。また、研削後のホイールをそのまま SEM 内の試料室に挿入し、砥石作業面上の砥粒の形状および摩耗面を観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 研削抵抗に及ぼす研削条件の影響 図 2 は切込み量 50 μm および 100 μm、送り速度 20 mm/min の条件のもとで、ホイール周速(以下周速と記す)を 10 m/s から 27.5 m/s まで変化させた場合の研削抵抗の変化を示したものである。なお、CBN ホイールはツルーイングおよびドレッシングを施さずに使用した。研削抵抗は周速の上昇に伴い漸減しており、これは周速の増加により砥粒一個あたりの削除量が減少するためである⁽⁹⁾。切込み 50 μm のときの法線分力は周速 10 m/s から 20 m/s にかけて顕著に減少しているが、20 m/s から 27.5 m/s の周速域では大きな変化は認められない。これは周速の増加に伴う研削温度の上昇は研削抵抗を減少させるが、一方で被削材の軟化による切りくずのチップポケットへの堆積は逆に研削抵抗を増加させる。したがって、この速度域で観察された研削抵抗は減少と増加の要因が相殺され、大きな変化を示さなかったと説明できる。

次に、切込み量 (t)、送り速度 (V_w)、周速 (V_s) を任意に変化させた場合の法線分力の挙動について調べた。図 3 は法線分力を tV_w/V_s 、すなわち実験条件を平均切りくず体積に比例した値に対して整理したものである。多少のばらつきはあるが、この両者の間には直線的な比例関係が認められ、その関係は次の式で表される⁽⁹⁾。

$$F_n = \lambda K_s t V_w / V_s + F_{n0} \dots \dots \dots (1)$$

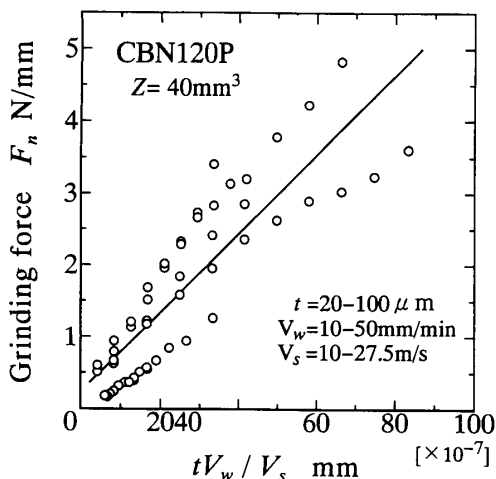


図3 法線分力と tV_w/V_s の関係

ここに、 K_s は比研削抵抗 (N/mm^2)、 λ は法線分力と接線分力との比 (分力比)、 F_{n0} は切込み零に対応した法線分力、すなわち掘起こしに必要な力である。また、法線分力は図3で示したように周速が高いほど小さくなり、切込み量ならびに送り速度が増加するほど大きくなることわかる。

図4は送り速度 20 mm/min、周速 10 m/s の条件のもとで、粒度の異なる5種類のホイールにおける研削抵抗を示している。粗粒ほど高い研削抵抗値を示しており、これは砥粒径が大きいほど設定切込み量を食い込むのに大きな加圧力が必要であること、連続切れ刃間隔が長くなるため砥粒一個あたりの被削材除去量が大きくなるためと考えられる。しかし、粒度が細くなることによる研削抵抗の減少率は粒度 200 あるいは 300 の細粒域では小さくなっている。これは砥粒径が小さくなると被削材への貫入は容易になるが、同時研削切れ刃数が多くなるため研削抵抗が増大し、またチップポケットの減少に伴って目詰まりが生じやすくなるため⁽¹⁰⁾と説明できる。

図5はCBN 120 Pで直径 18 mmの丸穴を研削した場合のトルクの変化を周速ごとに調べ、累積研削量に対して示したものである。図5より、前述の研削抵抗の場合と同様、トルクは周速が高くなるほど小さくなっており、トルクも砥粒一個あたりの削除量に比例することを示している。また、トルクは累積研削量の増加とともに増大し、その増加率は周速が低いほど大きくなっている。これは砥粒逃げ面に摩擦摩耗が生じるためであり、摩擦面積の増加は負荷される抵抗が大きいほど大きくなることわかる。図6はトルク測定時に求めた仕上げ面粗さおよび真円度の実験結果の一例である。これらの特性値は周速の増加に伴い全体的

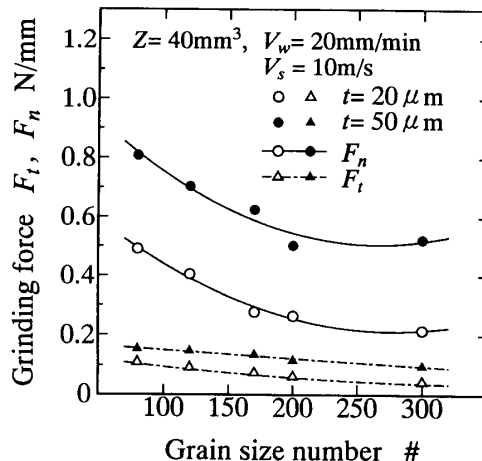


図4 研削抵抗に及ぼすホイール粒度の影響

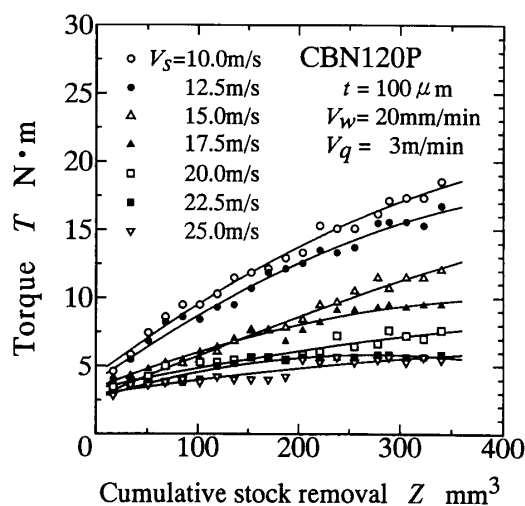


図5 累積研削量とトルクの関係

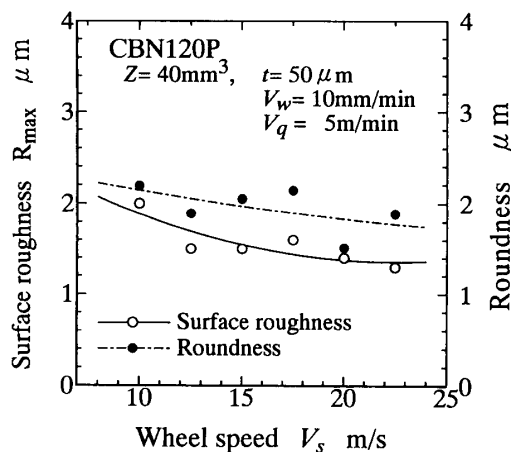


図6 仕上げ面粗さおよび真円度に及ぼすホイール周速の影響

にわずかながら減少しており、加工精度がトルクと相関があることがわかる。

3・2 累積研削量と研削抵抗との関係 ここでは

研削時間の増加による研削抵抗の変化を調べた。図7は直線加工のもとで図中に示した設定条件で実験を行ったときの法線および接線分力の累積研削量に対する変化を示したものである。また、参考として用いたWA砥石による実験結果を合せて示している。WA砥石の研削抵抗は切込み量が30 μm と比較的小さいにもかかわらず、わずかな研削量で急激に増大している。これは被削材が高硬度であり、WA砥粒のじん性、硬度などの機械的性質も劣っているため、図8(a)のSEM写真に示すように各砥粒には明りょうな平坦部が逃げ面に形成され、砥粒摩耗が急速に進行している。このため、被削材への食い込みに大きな圧力が必

要になり、研削抵抗が急増したと説明できる。

これに対し、CBNホイールの研削抵抗の増加率はWA砥石に比べればはるかに小さいが、累積研削量の増加に伴って明りょうに増加している。したがって、超砥粒であっても小径ホイールであるため、一つの砥粒が被削材除去に関与する頻度が高く、砥粒摩耗が進行することがわかる。CBN砥粒の逃げ面摩耗面積率と研削抵抗の間には図9のようにほぼ直線関係が成立しており、CBN砥粒の場合もアルミナ砥粒などの場合と同様に摩滅摩耗が研削抵抗増加を引き起こすことがわかる。

なお、図7でWA砥粒と同じ120 mm^3 研削した後のCBN砥粒の逃げ面には図8(b)に示すように大きな変化は認められなかった。しかし、CBN砥粒の法線分力は累積研削量120 mm^3 までの領域では著しく増加しており、これは以下の理由によるものと考えられる。本実験の電着CBNホイールはツルーイングを施さないで使用しているため、ホイール作業面における砥粒突出し高さは不ぞろいである。このため、研削初期には突出し高さの大きな少数の砥粒のみが被削材除去に関与し、比較的高い加圧力で被削材に食い込む。この時点では個々の砥粒への負荷が大きいためこれらの砥粒の摩滅摩耗は激しく、研削抵抗は急激に増加する。しかし、その後研削時間の経過とともに作用砥粒数がホイール作業面全体に及ぶと砥粒突出し高さはそろってくる。すなわち、同時研削切れ刃数が増加し、多くの砥粒が被削材除去に関与するようになる。その結果、砥粒逃げ面が全体的に平坦化し、加圧力が安定化すると研削抵抗の増加率は微小となり、研削抵抗は漸増するものと説明できる。

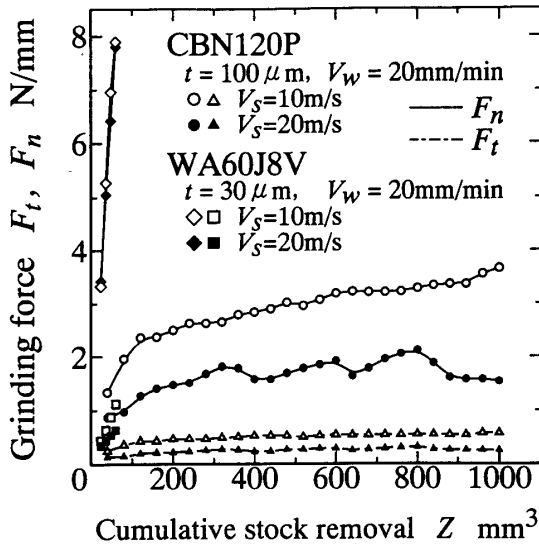


図7 累積研削量と研削抵抗の関係

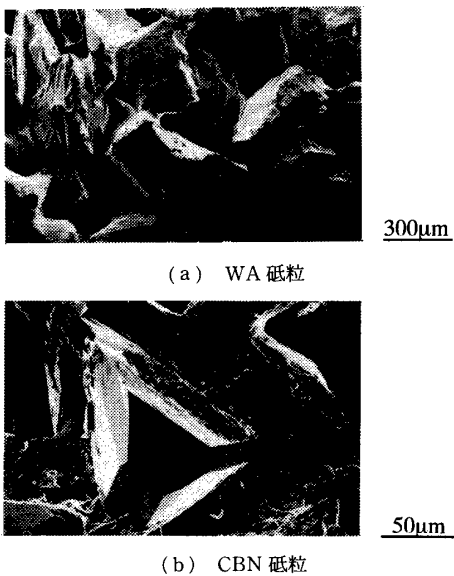


図8 120 mm^3 研削後のWAおよびCBN砥粒のSEM写真

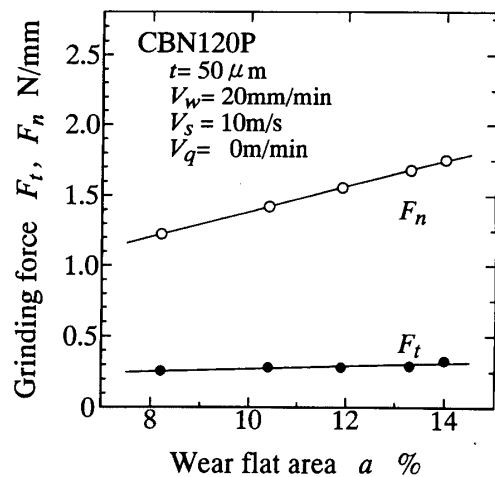


図9 砥粒逃げ面摩滅面積率と研削抵抗の関係

グを施さないで使用されるため、未使用の状態では砥粒突出し高さが不ぞろいであり、研削初期においては良好な仕上げ面が得られない。そこで、ツルーイングを行うことによって仕上げ面粗さがどの程度改善されるか、またそれに伴い研削抵抗がどのような挙動を示すかを調べた。ツルーイングには粒度 80 の単石ダイヤモンドを円周上に 60 個配置したロータリドレッサを用い、切込み量 $5 \mu\text{m}$ 、リード $100 \mu\text{m}/\text{rev}$ の条件で 10 回(両端切込み)行った。なお、ドレッサは CBN ホイール作用面の軸方向に対して 45° 傾斜させた。

図 10 はツルーイングを施した場合と施さなかった場合の累積研削量に対する研削抵抗の変化を示したものである。ツルーイングを施さない場合の研削抵抗は研削初期に著しく増大するが、ツルーイングを施すことによってその増加率は小さく、また値も低くなる。しかし、研削時間の進行に伴って砥粒逃げ面が摩耗すると研削抵抗は増大し、累積研削量 1000 mm^3 での法線分力は施さない場合とほぼ同じ値となっている。研削初期に研削抵抗値が比較的低いのは、ロータリドレッサのダイヤモンド粒子と CBN 砥粒との衝突時の衝撃により砥粒が微細破壊を起こし、鋭利な切れ刃が砥粒逃げ面に形成され、ホイールの切れ味が向上するためと考えられる。また、ツルーイングによって砥粒突出し高さがそろうため、研削抵抗の上昇率は低く、しかも安定している。しかし、研削が進行すると切れ刃が摩滅摩耗を起こして平坦部が形成され、研削抵抗は次第に上昇するようになる。

図 11 に図 10 と同時に測定した仕上げ面粗さの結果を示す。ツルーイングを施すことにより仕上げ面粗さは半分程度まで改善されており、これは研削初期から

砥粒突出し量がある程度そろっており、同時研削切れ刃数もツルーイングを施していないホイールに比較して多いためと考えられる。

3・4 内径の異なる穴における研削抵抗 3・3 節までは直線加工を行った場合の研削抵抗について論じた。本研究のような内面研削では穴径の変化は接触弧長さの増減を伴うため、極めて重要な実験上の因子と考えられる。そこで、内径 14 mm 、 18 mm 、 26 mm の被削材で実験を行った場合の累積研削量に対する接線分力の変化を図 12 に示す。また、直線加工の結果も合わせて示す。接線分力は内径が小さいほど値が大きく、また累積研削量に対する増加割合も大きくなっている。直線加工(図中 Straight として表示)では抵抗値も小さく、またその増加率も行った実験範囲内では最も

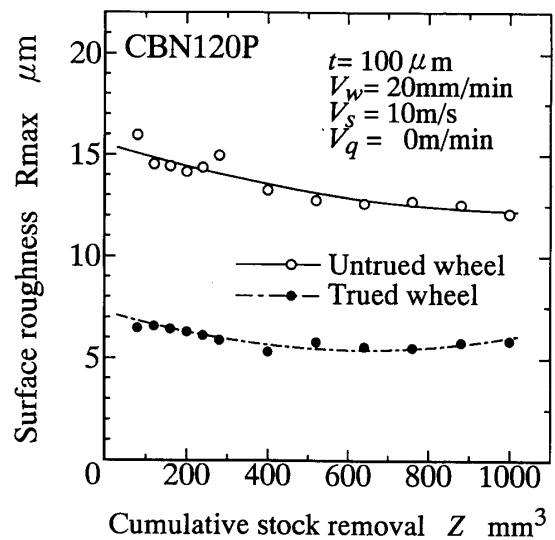


図 11 仕上げ面粗さに及ぼすツルーイングの影響

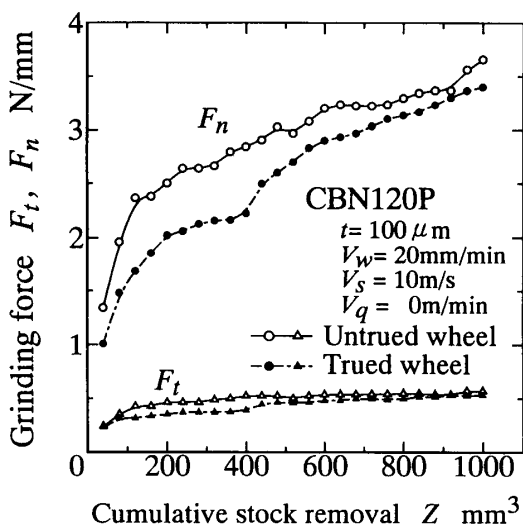


図 10 研削抵抗に及ぼすツルーイングの効果

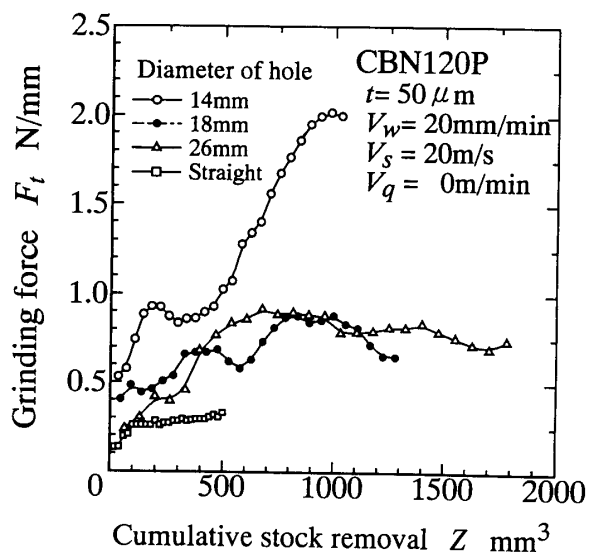


図 12 内径の異なる穴加工における研削抵抗の挙動

小さくなっている。これらの結果は接触弧が長くなると砥粒一個あたりの削除量が増加するため研削抵抗が大きくなり、また砥粒摩耗の進行も顕著となることで説明できる。

一方、累積研削量の増加に伴って、研削抵抗は1個あるいは数個の極大値を示しながら増大している。これらの変動理由は以下のように考えられる。長い接触弧と少ない作用砥粒数のため砥粒摩耗が進行し、その結果砥粒に大きな負荷がかかるようになる。その負荷がある臨界値を超えたり、突発的な衝撃が加わると砥粒逃げ面に微細破壊が起こり、切れ味が回復して研削抵抗は減少する。しかし、累積研削量の増加は再び砥粒を摩耗させ、研削抵抗は増加する。これらが繰返されるため、研削抵抗の変動が観察されると考えられる。変動の大きさや周期は主として接触弧長さに依存し、長いほど(小径穴ほど)研削抵抗が大きいため砥粒摩耗の進行が早く、変動は顕著に、かつ短い周期で発生すると考えられる。

3・5 クイル運動の研削抵抗に及ぼす影響 これまでは、ホイールに主軸方向の往復運動、すなわちクイル運動を与えない場合の研削実験について議論した(ただし、図2~12のうち、図5および6はクイル運動を付加した実験である)。ここでは、ホイールにクイル運動を与えた場合の研削の抵抗変化、加工能率および仕上げ面粗さの挙動について考察する。図13にクイル速度3 m/minの条件のもとで研削を行ったときの累積研削量と研削抵抗との関係を示す。また、クイル運動を与えなかった場合の実験結果も比較のため合せて示す。図13より明らかなように、研削抵抗は接線分力、法線分力ともクイル運動を与えることによって約半分

から2/3まで軽減される。これは以下のように説明できる。

いま、被削材の幅を B とする。クイル運動の有無に関わらず、単位時間あたりの削除量 q は

$$q = BtV_w \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。また、同時に作用する砥粒切れ刃数は、連続切れ刃間隔を a とすると、クイル運動なしの場合には

$$n_1 = V_s B / a^2 \dots\dots\dots (3)$$

となり、クイル運動を加えた場合はホイールが主軸方向に単位時間内にクイル運動量 L_q だけ多く運動するため、

$$n_2 = V_s(B + L_q) / a^2 \dots\dots\dots (4)$$

となる。そこで、一個の切れ刃が削除する平均切りくず体積は、それぞれ

$$Z_c = q / n_1 = a^2 t V_w / V_s \dots\dots\dots (5)$$

$$Z'_c = q / n_2 = a^2 t V_w B / (V_s(B + L_q)) \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。したがって、両者の比は

$$Z'_c / Z_c = B / (B + L_q) \dots\dots\dots (7)$$

となり、 L_q が 1 000/60 mm($V_q = 1$ m/min) から 5 000/60 mm($V_q = 5$ m/min) と増加するにつれて式(7)の値は 0.32 より 0.088 まで変化する。この数値は図14に示した実験結果と近く、クイル運動の効果は単位時間に作用する砥粒切れ刃数を増加させ、平均切りくず体積(クイル運動を加えても接触弧長さは変化しないから、平均切りくず断面積も同様)を小さくさせる効果があることがわかる。

図15はクイル運動を与えた場合の研削前後の砥粒形状の変化を研削量 1 000 mm³ の段階で観察したものである。クイル運動を与えると砥粒面に衝撃による

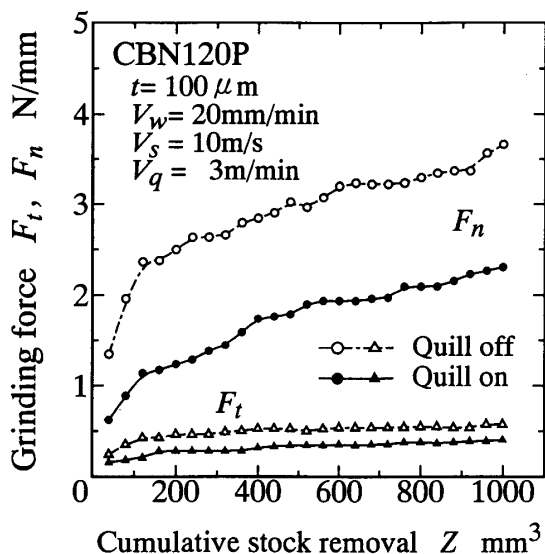


図13 研削抵抗に及ぼすクイル運動付加の効果

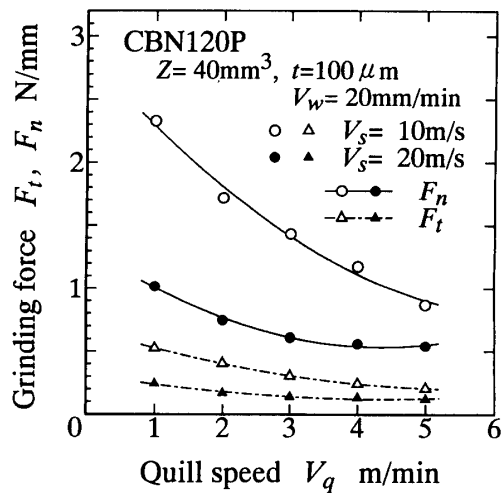


図14 研削抵抗に及ぼすクイル速度の影響

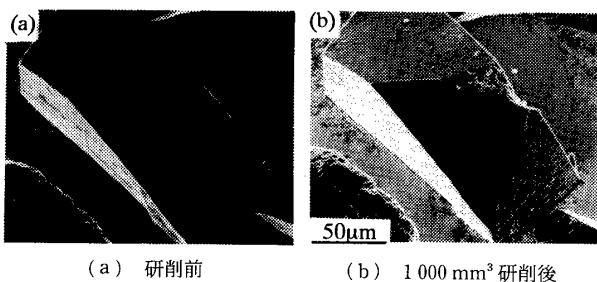


図 15 クイル運動付加による CBN 砥粒逃げ面の形状変化

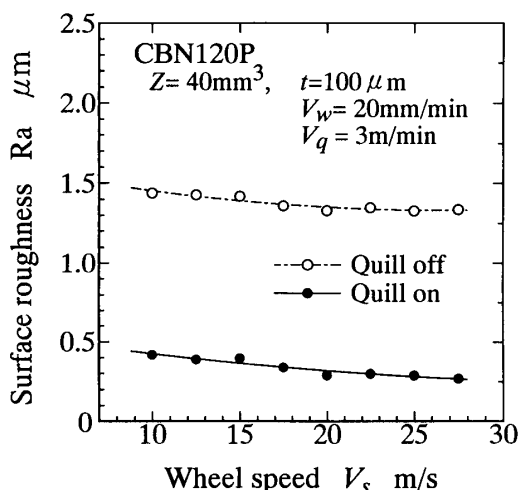


図 16 仕上げ面粗さに及ぼすクイル運動付加の効果

と思われる欠損が認められ、鋭敏な切れ刃が形成されている。このことも研削抵抗が低減された原因の一つと推察される。また、図 16 は仕上げ面粗さに及ぼすクイル運動付加の効果を各周速ごとに調べたものであり、クイル運動を与えることにより仕上げ面粗さ Ra は約 1/5 に改善されている。これは式(4)より明らかなように、クイル運動により主軸方向に作用する砥粒切れ刃数が増加し、見かけ上連続切れ刃間隔が小さくなったことによると説明できる。

以上述べた結果から、ジグ研削の高能率化および高精度化は、CBN ホイールを用いて高い周速のもとで削除率を大きく、またクイル運動を速くすることにより達成できることがわかった。しかし、内面研削においては、砥石まわりの剛性をいかに高め、より高い周速を実現させるかが今後の大きな課題と考えられる。

4. 結 言

電着 CBN ホイールを用いて小径穴の精密ジグ研削実験を行い、研削条件による研削抵抗変化の挙動を調

べた。また、砥粒摩耗状態の SEM 観察および砥粒逃げ面摩耗平坦率の変化を追跡し、研削条件が仕上げ面粗さに与える影響を調べた。得られた結論を要約すると以下のとおりである。

(1) 研削抵抗はホイール周速の増加に伴い漸減し、平均切りくず体積の増加に対して直線的に増加する。また、砥粒の粒度が 80~170 の範囲では細粒ほど低くなるが、それより粒度を高くしても低下しない。

(2) トルクはホイール周速が増加すると減少し、累積研削量の増加に伴いわずかながら増大する。仕上げ面粗さおよび真円度もホイール周速が増加すると向上する。

(3) 研削抵抗は接線、法線分力とも累積研削量の増加に伴い増大する。増加率は特に研削初期において顕著である。接線分力の増加は全研削時間を通してわずかであるが、法線分力は比較的大きな増加率で直線的に増大する。

(4) 電着 CBN ホイールの摩耗は砥粒突出し高さがそろっていない研削初期に多く、それ以降は研削時間の経過に伴い極めて少なくなる。

(5) 電着 CBN ホイールにツルーイングを施すことにより研削抵抗は研削初期では低くなるが、累積研削量の増加に伴いツルーイングの効果は少なくなる。

(6) 主軸にクイル運動を与えることにより、研削抵抗は約 2/3 まで低下し、仕上げ面粗さは 1/5 程度まで改善される。これは主軸方向へのホイールの運動により、単位時間に作用する砥粒切れ刃数が増加し、平均切りくず体積が減少するためである。

文 献

- (1) 岩崎, ジグ研削盤による金型加工, プレス技術, 30-9(1992), 56.
- (2) 辻 修二編, 研削盤活用マニュアル, (1990), 125, 大河出版.
- (3) 田中, 32 ビット CNC 超精密同時 5 軸ジグ研削盤について, マシニスト, 31-11(1989), 50.
- (4) 稲崎, 連続ドレッシングクリープフィード研削, 工作機械シリーズ(先端研削技術), (1985), 55, 大河出版.
- (5) 橋本, 金型加工のための超硬電着砥石とその活用法, 機械と工具, 28-3(1984), 20.
- (6) 喜田, T/D を用いた MC 研削に関する基礎研究, 精密工学会誌, 58-5(1992), 835.
- (7) 横川, 研削加工のすすめ方, (1992), 87, 工業調査会.
- (8) 長谷川・ほか 3 名, 高送り電解研削に関する研究, 精密工学会誌, 52-7(1986), 1236.
- (9) 小野, 理論切削工学, (1984), 177, 現代工学社.
- (10) 海野, CBN・ダイヤモンドホイールの使い方, (1991), 61, 工業調査会.