超硬合金の切削に関する研究*

—旋削におけるPCD工具の摩耗機構と切削抵抗—

許 盛中** 宮本 猛*** 花崎伸作*** 藤原順介***

Study on Cutting of Cemented Carbides

- Wear Mechanism of PCD Tool and Cutting Force in Turning -

Sung Jung HEO, Takeshi MIYAMOTO, Shinsaku HANASAKI and Junsuke FUJIWARA

The machinability of wear-resistible cemented carbides and the tool wear behavior in machining of V30 and V50 cemented carbides using PCD (Poly Crystalline Diamond) cutting tool was investigated to understand machining characteristics. This material is one of the difficult-to-cut materials in present, but their usage has been already broadened to every commercial applications such as mining tools, and impact resistant tools etc. Summary of the results are as follows. (1) Tool wear progression of PCD tools in turning of wear-resistible cemented carbides were observed specially fast in primary cutting distance within 10m. (2) Three components of cutting resistance in this research were different in balance from the ordinary cutting such as that cutting of steel or cast iron. Those were expressed large value by order of thrust force, principal force, feed force. (3) If presume from viewpoint of high efficient cutting within this research, a proper cutting speed was 15m/min and a proper feed rate was 0.1mm/rev. In this case, it was found that the tool life of PCD tool was cutting distance until 230m approximately. (4) In cutting of wear-resistible cemented carbides such as V30 and V50, it was recognized that the tool wear rate of V30 was very fast as compared with V50. (5) When the depth of cut was 0.1mm, there was no influence of the feed rate on the feed force. And the feed force tended to decrease as the cutting distance was long, because the tool was worn and the tool edge retreated. (6) It was observed that the cemented carbides were adhered to the flank.

Key words: cutting of cemented carbide, PCD cutting tool, tool wear, cutting force, EDS

1. 緒 言

超硬合金 (cemented carbides) は低温硬さはもちろん、高温硬さが優れ、高強度で諸物性安定であることを特徴としており、切削工具用途だけでなく鉱石や石炭の掘削に使用される鉱山用工具、トンネル工事用のビット、都市再開発などのコンクリート穿孔用工具、鉄鋼の圧延ロールなどの耐摩耗・耐衝撃用にも多く使用されている。これら超硬合金の中で耐摩耗・耐衝撃用に使用されるものは、切削工具用の超硬合金に比べると結合成分のコバルト(Co)を多く含有し硬質成分のタングステンカーバイドの粒径も粗大なものが使用されている。

このような超高硬度特性の難削材である超硬合金の加工は、切削加工が難しく、一般的に最終工程としては研削加工によって行われているのが現実である。そこでは、研削加工に費やす時間が多大となり非能率的であるだけでなく、生産コストが高くなるという問題が生じている。これらの問題を解決するために超硬合金の旋削に関する研究は行われているが、被削材である超硬合金が高価であるなどの理由により工具寿命、表面粗さや切削抵抗などの報告に留まっている^{1)~4)}。

そこで、本研究では超硬合金の精密切削の可能性を深めるために、V30とV50の二種類の耐摩耗工具用超硬合金の旋削を行い、切削条件の変化による切削特性について検討を加えた。

また、超硬合金の切削に優れているという報告がなされているダイヤモンド焼結体(PCD: Poly Crystalline Diamond)工具を用い、その摩耗機構や切削抵抗の特性について調べた。

2. 実験装置および方法

実験には、MAZAK社製、精密高速旋盤(回転数 33~2000rpm, 送り 0.075~0.499mm/rev, 動力 3.7kW)を使用し、基礎データを取ることを目的として乾式による外周旋削を行った。実験に用いた被削材は、被削材中のタングステンカーバイド(WC)とコバルト(Co)量による切削特性を把握するため、耐摩耗衝撃工具用超硬合金 V30 と V50(JIS 分類記号)を用いた。被削材は、外径 110mm, 内径 90mm, 長さ 200mm の中空円筒材であり、右端は冷しばめされた鋼材の中心を止まりセンタにて支持した。被削材の化学組成を表 1 に、主な機械的性質を表 2 にそれぞれ示す。

使用工具としては、ETG NR1616 ホルダに、刃先の鋭利な多結晶ダイヤモンド焼結体 DX140 がロウ付けされたスローアウェイチップ TNGA160408(以後 PCD 工具と略記する)を取り付けたものを用いた。工具形状は、(-5, -5, 5, 5, 30, 0, 0.8)である。主な旋削条件は、表 3 に示す通りである。一般に超硬合金の切削は低速が適しているとの実験報告⁴⁾があり、15m/min 以下の 2通りの切削速度について旋削を行った。切込みおよび送り速度については主に推奨されている条件で行い、送り速度については加工能率を勘案し 0.2mm/rev でも行った。

3. 実験結果

3.1 工具初期摩耗特性

切削初期の工具摩耗特性を調べるために、切削距離 5m 毎に工具観察および逃げ面工具摩耗量の測定を行った。図 1 は、PCD 工具を用い、切削速度 10m/min で V50 を切削したときの工具逃げ面およびすくい面摩耗部の光学顕微鏡写真である。

* 原稿受付 平成 15 年 3 月 11 日

** 正 会 員 大阪大学大学院 (現、斗源工科大学; 韓国)

*** 正 会 員 大阪大学大学院 (吹田市山田丘 2-1)

Table 1 Chemical compositions of cemented carbides (wt%)

Cemented carbides	W	Co	C
V30	79~87	7~16	5~6
V50	73.3~78.0	17~22	4.7~5.1

Table 2 Mechanical properties of cemented carbides

Cemented carbides	Specific gravity (Mg/m ³)	Hardness (HRA)	Compressive strength (GPa)	Young's modulus (GPa)
V30	14.4	88.5	4.61	578
V50	13.5	84.0	3.53	500

Table 3 Cutting conditions

Cutting speed (m/min)	10, 15
Feed rate (mm/rev)	0.1, 0.2
Depth of cut (mm)	0.1

図1に示すように、切削距離が10mから20mまでの切削初期では切れ刃とはほぼ平行な逃げ面摩耗が形成され、切り取り厚さの影響が小さいことを示している。図(c)に見られるように、切削距離40mでは、前逃げ面境界部の摩耗が増加し最大摩耗量となっている。このように超硬合金の切削では、切削初期の段階から摩耗形態の変化が見て取れる。図(d)では、すくい面刃先には擦過の形跡は見られるが、逃げ面に比べ大きな摩耗は生じていない。また、図2に切削距離40mまでの工具逃げ面摩耗と切削距離の関係を示す。PCD工具を用いてFRM⁵⁾などの高硬度繊維を含有する難削材を切削したときと同様、切削初期において激しく摩耗し、その後切削距離が長くなるに伴い工具摩耗量も増加していく。

Fig.1 Optical micro photographs of tool wear progression in primary cutting

V=10m/min, f=0.1mm/rev, t=0.1mm, workpiece: V50

Fig.2 Relation between flank wear width and cutting distance in primary cutting

図3にPCD工具を用いて耐摩耗用超硬合金を切削距離40mまでの初期切削を行った場合の切削抵抗を示す。切削距離20mから30mまでの背分力変化の割合が相対的に大きくなっている。この時点での工具摩耗形態は、図1(b)(c)から分かるように切れ刃に平行な水平摩耗から前逃げ面境界部での摩耗増加へ変移しており、摩耗面積の増加に伴い背分力が大きくなっている。

と考えられる。また、切削初期の段階では主分力ならびに送り分力については大きな変化は見られず、焼入鋼などの高硬度材の切削で見られる傾向と同様に背分力が最も大きな値を示す結果となった。切込みが小さい場合には、主分力に対する背分力の比が大きくなる傾向はあるが、同条件で一般鋼を切削した場合と比較しても背分力が他の分力に比べて大きいのは超硬合金のような高硬度材の切削における特徴の一つと思われる。

V=10m/min, f=0.1mm/rev, t=0.1mm, workpiece: V50

Fig.3 Relation between cutting force and cutting distance

一方、この条件での超硬合金の切削における切削抵抗は、切込みや送り速度が小さいため絶対量としては大きくないが比切削抵抗の値に計算すると、この値は一般鋼や一般鋳鉄の場合に比べると極めて大きいことが分かる。すなわち、比切削抵抗=切削抵抗/(切込み×送り)の計算式⁶⁾で簡単に計算すると表4のように大きな値が算出される。

Table 4 Specific cutting forces

V=10m/min, f=0.1mm/rev, t=0.1mm, workpiece: V50

Cutting distance (m)	Principal force (GPa)	Thrust force (GPa)	Feed force (GPa)
10	7.3	7.5	1.61
20	6.9	7.7	1.62
30	6.8	10.9	1.88
40	7.3	11.6	1.84

3.2 工具摩耗特性

3.2.1 工具摩耗量に及ぼす切削速度の影響

図4は切削速度10m/minおよび15m/minの場合について切削距離と逃げ面摩耗幅との関係を示したものであり、切削距離にはほぼ比例して工具摩耗が大きくなっている。逃げ面摩耗幅の変化はいずれの場合も同様の傾向を示しており、切削速度が変化しても工具寿命の差異はほとんど現れていない。なお、本実験における工具寿命の判定基準は、逃げ面摩耗幅で0.3mmとし、工具寿命まで10m毎に測定を行った。

f=0.1mm/rev, t=0.1mm, workpiece: V50

Fig.4 Relation between flank wear width and cutting distance

図4の結果から高効率切削条件の観点で推定すると、本研究で設定した二つの切削速度の中では15m/minが適性と判断される。なお、送り速度および切込みにおいても図4の旋削条件

が妥当と判断される場合、工具寿命まで可能な切削距離はおよそ 230m である。

3.2.2 工具摩耗量に及ぼす被削材硬度の影響

被削材硬度が異なる二種類の超硬合金における切削距離 120m での工具逃げ面摩耗形態について観察した一例が図 5 である。摩耗の特徴として、V30 と V50 とともにチッピングは認められないが、切削距離 120m の段階では V50 に比べ V30 の逃げ面摩耗量は 1.5 倍とかなり大きい。

被削材の硬度差が工具寿命に及ぼす影響を調べるため、超硬合金の材種による切削距離と工具摩耗の関係を図 6 に示す。図 6 において切削距離 40m までは V30 と V50 に少し摩耗幅の差はあるが緩やかに増加している。この切削距離以上では被削材材種の違いにより摩耗成長の速度差が大きくなっている。表 2 に示した被削材硬度の差が、工具寿命に大きく影響を及ぼすと推察される。

(a) Flank (workpiece: V50) (b) Flank (workpiece: V30)
L=120m, V=15m/min, f=0.1mm/rev, t=0.1mm
Fig.5 Optical micro photographs of tool wears

V=15m/min, f=0.1mm/rev, t=0.1mm
Fig.6 Relation between flank wear width and cutting distance

3.2.3 工具摩耗量に及ぼす送り速度の影響

工具寿命に及ぼす送り速度の影響を調べるため、切削速度 15m/min で、送り速度 0.1 および 0.2mm/rev について工具摩耗の光学顕微鏡写真を図 7 に示す。切削距離は 40m である。この図から、比較的安定した摩耗状態となっているが、送り速度が 0.2mm/rev に増加すると逃げ面摩耗は激しくなり、1.4 倍程度の大きさとなっている。

(a) Flank (f=0.1mm/rev) (b) Flank (f=0.2mm/rev)
VB=101μm VB=145μm
L=40m, V=15m/min, t=0.1mm, workpiece: V30
Fig.7 Optical micro photographs of tool wears

図 8 に切削距離 80m の時点での逃げ面の光学顕微鏡写真を示す。送り速度 0.1 および 0.2mm/rev において、工具摩耗形態は水平摩耗から前逃げ面境界部摩耗の増加へと移ることは同様であるが、切削距離が 80m では送り速度が 0.2mm/rev において逃げ面摩耗量、特に前逃げ面境界部の摩耗量が多いのが明

(a) Flank (f=0.1mm/rev) (b) Flank (f=0.2mm/rev)
VB=189μm VB=238μm
L=80m, V=15m/min, t=0.1mm, workpiece: V30
Fig.8 Optical micro photographs of tool wears

V=15m/min, t=0.1mm, workpiece: V30
Fig.9 Relation between flank wear width and cutting distance

らかである。

図 9 に切削速度 15m/min、送り速度 0.1 および 0.2mm/rev で切削した場合の切削距離と逃げ面摩耗幅の関係を示す。両送り速度ともに切削初期での急激な増加を除外すると直線的に増加している。また、送り速度 0.2mm/rev の場合は 0.1mm/rev と比べ工具寿命までに達する摩耗増加率が急である。

以上のことから、工具寿命の観点から考えると送り速度 0.1mm/rev が適正な送り速度であると判断される。

3.3 切削抵抗特性

3.3.1 切削抵抗に及ぼす切削速度の影響

図 10 に切削速度 10 および 15m/min の場合の切削距離による切削抵抗の変化を示す。背分力では多少のばらつきが見られるが、切削距離にほぼ比例して大きくなっている。

図 10 により本実験で行った速度域では、切削距離 180m 以上の背分力において切削速度 10m/min の方が少し大きくなっているが全体的に 3 分力とも差は見られない。背分力について

f=0.1mm/rev, t=0.1mm, workpiece: V50
Fig.10 Relation between cutting force and cutting distance

は図4と同じ傾向であることから、工具逃げ面摩耗量と密接に関係していると考えられる。切削距離が長くなればなるほど3分力ともに増加する一般鋼を切削する場合と異なり、超硬合金を切削する場合には切削距離が長くなると、送り分力がむしろ減少することもあることが分かる。

3.3.2 切削抵抗に及ぼす被削材硬度的影響

3.2.1 と 3.3.1 の結果から適正な切削条件と認められた切削速度 15m/min について、切削距離による切削抵抗の変化を被削材種を変えて測定したものが図 11 である。切削抵抗は被削材の硬度が高い V30 および低い V50 における3分力とも摩耗の進行により増加する。しかしながら、送り分力の増加率は背分力および主分力と比較すると小さく、加えて、被削材の硬度差による影響も小さい。

V=15m/min, f=0.1mm/rev, t=0.1mm
Fig.11 Relation between cutting force and cutting distance

3.3.3 切削抵抗に及ぼす送り速度の影響

図 12 に送り速度 0.1 および 0.2mm/rev の場合の切削距離による切削抵抗の変化を示す。各送り速度とも切削距離にほぼ比例して切削抵抗が大きくなっているが、0.2mm/rev の送り速度における背分力、主分力が著しく増大する傾向が見られる。特に背分力の変動幅は切削開始直後から非常に大きくなっており、工具摩耗を促進させる一つの原因と思われる。従って、図 9 と対応してみると本研究で設定した二つの送り速度の中では 0.1mm/rev が適性と判断される。一方、送り分力は、送りの影響はほとんど認められない。むしろ切削距離 80m 以上では送り 0.2mm/rev の方が小さくなっている。このことは、切込み量が送り分力に大きな影響を持っていると考えられる。

ここで、切削抵抗について切削距離との関係について考察を加える。まず、送り分力について切削距離が増加してもほとんど変化が見られなかった、図 10 の被削材 V50、切削速度 15m/min、送り速度 0.1mm/rev、切込み 0.1mm を例に挙げる。切削初期（切削距離 10m）および切削距離 230m での逃げ面摩耗幅は図 4 よりそれぞれ 40 μ m、312 μ m であった。この逃げ面摩耗量と逃げ角から幾何学的に計算すると切削初期から 24 μ m 刃先が後退していることになり、コーナー半径が 0.8mm であることから前逃げ面境界部の摩耗は送り方向（図 13 の左方向）へ 137 μ m 広がると計算できる。図 13 に示すように平行摩耗の刃先先端からの起点は切込み 0.1mm から想定される地点（図 13 の摩耗右端部）であるとする、光学顕微鏡写真から

V=15m/min, t=0.1mm, workpiece: V30
Fig.12 Relation between cutting force and cutting distance

Fig.13 Wear at cutting edge

ら逃げ面摩耗部の送り方向への広がり は 134 μ m と測定され、幾何学的な計算とはほぼ一致している。従って、切削距離 230m では刃先が 24 μ m 後退しており、切込み 0.1mm に対して 24% だけ減少していることになる。これが送り分力の減少につながっていると考えられる。図 12 の送り分力について逃げ面摩耗幅の差が大きくなる切削距離 80m 以上では、摩耗の大きな送り速度 0.2mm/rev の方が 0.1mm/rev より送り分力は小さくなっている。主分力については摩耗面での摩擦力増加のため摩耗による刃先の後退量の影響は小さく、加えてすくい面の摩耗がほとんど見られないことから、逃げ面摩耗の増加とともに緩やかに増加している。背分力については逃げ面摩耗の増加とはほぼ比例するように増加している。これは逃げ面の摩耗面積の増加に比例している。以上のことから、超硬合金の切削では、工具摩耗状態が切削抵抗に大きな影響を及ぼすと考えられ、切削抵抗からも加工精度を知ることができる。従って、精密切削を行う上で、最終工程の前段階としてこの条件で切削を行い仕上げ精度を得るには切削抵抗の変動、特に背分力の傾向を知る必要がある。

3.4 工具摩耗面観察

前節で工具逃げ面摩耗状態が切削抵抗に与える影響について述べたが、ここではその摩耗面の観察を行った。最も摩耗が激しかった被削材 V30、切削速度 15m/min、送り速度 0.2mm/rev、切込み 0.1mm の SEM による観察結果を図 14 に示す。切削距離は 120m である。図 (a) が逃げ面摩耗部全体であり、図 (b) はその一部を拡大したものである。図 (b) の黒い箇所には、切削方向に擦られた形跡が見られ、その付近では工具のカケは生じておらず明らかに超硬合金に含まれる高硬度 WC 粒子による引っ掻きによる摩耗が生じている。

一方で、SEM 観察（図 14(a)）では大きな付着物が認められ、その付着物についてエネルギー分散法(EDS)による成分分析を行った。成分分析を行った摩耗部の範囲は、図 14 の(b)であり、

(a) SEM observation of tool wear (b) EDS area
V=15m/min, f=0.2mm/rev, t=0.1mm, workpiece: V30
Fig.14 SEM observations of tool wear

(a) Component of tungsten (W) (b) Component of cobalt (Co)

(c) Component of carbide (C)
V=15m/min, f=0.2mm/rev, t=0.1mm, workpiece: V30
Fig.15 Component analysis of tool wear surface by EDS

その結果を図 15(a)～(c)に示す。これらの図では、白いエリアに成分が存在していることを示している。図(a)よりタングステンについては付着物全域に存在しており、この付着物は超合金であることが分かった。また、図(b)からコバルトは付着物が存在する箇所だけでなく摩耗部全域に付着している。また、この観察エリアには焼結ダイヤモンドの素地も含まれており、図(c)からそれが伺える。

送り速度 0.1mm/rev での工具摩耗部写真を図 16 に示す。図 (a) 中、四角で囲ったエリアについても EDS による成分分析を行ったが、0.2mm/rev の場合とほぼ同様の成分結果が得られた。しかし、付着物が存在する面積は 0.2mm/rev と比べると小さく、成分分析を行ったエリア、図 (b) には擦過された形跡に加えて、楕円形で囲った箇所に剥離のような形跡（黒い斑点部）が見られた。すなわちこのエリアには擦られて付着していた超合金が存在していて、切削中剥離したと思われる。従って、工具の摩耗生成機構としては、高硬度 WC による引っ掻き摩耗

(a) SEM observation of tool wear (b) EDS area
V=15m/min, f=0.1mm/rev, t=0.1mm, workpiece: V30
Fig.16 SEM observations of tool wear

に加えて、超合金の脱着の繰り返しによる摩耗が挙げられることが分かった。しかしながら、この脱着を繰り返す原因については未だ不明であり、今後の研究で明らかにしていきたいと考えている。

4. 結 言

本研究において、V30 と V50 の二種類の耐摩耗工具用超合金をダイヤモンド焼結体(PCD: Poly Crystalline Diamond) 工具で旋削し、切削条件の変化における切削距離による切削特性について調べ、工具の摩耗機構や切削抵抗の特性について考察した。得られた主な結果は次の通りである。

- (1) PCD 工具を用いて超合金を旋削する場合には切削距離 10m までの切削初期において工具摩耗の進行がさらに早く現れた。
- (2) 通常の鋼や鋳鉄の切削に比べて切削抵抗の3分力のバランスが異なった。すなわち、背分力>主分力>送り分力の順に大きな値を示した。
- (3) 高能率切削条件の観点として推定すると、本研究では適正な切削速度が V=15m/min、送り速度は 0.1mm/rev と判断される。この場合、工具寿命まで可能な切削距離はおおよそ 230m であった。
- (4) PCD 工具を用いて V30 と V50 を旋削する場合、既存の研究と異なり、V30 の場合が V50 と比べて摩耗増加がかなり急であった。
- (5) 実験を行った切込み 0.1mm の条件では、送り分力は送り速度の影響をほとんど受けず、摩耗による刃先後退により低下傾向を示した。
- (6) 逃げ面摩耗部に超合金の付着が認められた。

終わりに、本研究は、平成 14 年度科学研究費補助金（若手研究(B)課題番号 14750088）の研究助成金の一部で研究を行ったものであることを付記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 加工データファイル, (財)機械振興協会技術研究所, (1997) 95-0323.
- 2) 加工データファイル, (財)機械振興協会技術研究所, (1997) 95-0325.
- 3) 加工データファイル, (財)機械振興協会技術研究所, (1995) 92-0298.
- 4) 木村彦彦, 木曾弘隆, 鈴木雅春: 多結晶焼結体工具による超合金の旋削, 1985 年度精機学会春季大会学術講演会論文集(1985) 603.
- 5) 花崎伸作, 宮本猛, 藤原順介, 安富雅典, 峠睦: 6061 アルミニウム合金基複合材料切削時の工具摩耗機構, 軽金属, 49, 3 (1999) 112.
- 6) 臼井英治: 切削研削加工学 (上), 共立出版株式会社, (1988) 21.