

# 超硬合金の切削における WC 粒子径および Co 含有量の影響

谷口 友秋\* 宮本 猛\*\* 斉藤 茂\*\*\* 西田 匡志\*\*\*\*

## Influence of WC Grain Size and Co Content in Cutting Cemented Carbides

Tomoaki TANIGUCHI\* Takeshi MIYAMOTO\*\* Sigeru SAITO\*\*\* Tadashi NISHIDA\*\*\*\*

### ABSTRACT

Cemented carbides have high hardness and strength even in high temperature, and are used for not only cutting tools but also forming rolls, dies and so on. They are well known as difficult-to-cut materials because the tool wear is so severe in cutting with a diamond tool. As the results, the productivity becomes low and the production cost becomes high. In previous studies, the relationship between tool life and cutting conditions was investigated in detail by cutting with PCD (Poly-Crystal Diamond) tool. But it wasn't made clear, because the common cemented carbides had a variety of WC grain sizes and Co contents. In this study, the influence of WC grain size and Co content is investigated in detail by observing the tool after turning eight types of cemented carbides. They have the WC grain size of 2 or 7  $\mu\text{m}$ , which have the Co contents of 10, 15, 20 and 25%.

*Key words:* Cemented carbides, WC grain size, Co content, PCD tool, cBN tool, turning

### 1. 緒言

鉄 (Fe) やコバルト (Co) などの金属を結合剤として、炭化物粉末を焼結結合した合金を超硬合金と呼ぶ。超硬合金は高強度特性を有することから、切削用工具、鉄鋼の圧延用ロール、また近年では金型用材料としても注目を集めている。それらは主に粉末冶金法により最終形状に焼結して製造されるが、近年では超硬合金素材の多様化や製品形状の複雑化に伴い、研削加工による仕上げ加工や切削加工による中仕上げ加工が行われている。しかしながら、超硬合金は難削材であり、切削時には激しい工具摩耗が生じる。工具摩耗要因には超硬合金中の硬質粒子タングステンカーバイド (WC) による機械的な摩耗機構<sup>(1)</sup>が挙げられるが、WC 含有量の少ない超硬合金の切削でも工具摩耗が大きくなることが報告<sup>(2)</sup>されている。許ら<sup>(1)</sup>は、超硬合金の切削において機械的な摩耗機構と異なる摩耗要因が存在することを示唆しており、工具摩耗部の凝着物の脱落による摩耗機構の影響が推測される。

本研究では硬質粒子 WC による機械的な摩耗機構と凝着物の脱落による摩耗機構、それぞれが工具摩耗にどのように関係しているかを調べることを目的として WC 粒子径を統一し、Co 含有量の異なる超硬合金の旋削を行った。WC 粒子径を 2  $\mu\text{m}$  と 7  $\mu\text{m}$  の 2 種類、Co 含有量を 10, 15, 20 および 25% の 4 種類、計 8 種類の超硬合金を被削材として使用し、工具摩耗生成機構について詳細に調べた。

\* 専攻科 機械システム工学専攻

\*\* 機械工学科 准教授

\*\*\* 機械工学科 教授

\*\*\*\* 本科 機械工学科

### 2. 実験装置および方法

Fig. 1 に示す NC 旋盤を用いて、WC 粒子径と Co 含有量の異なる 8 種類の超硬合金を端面旋削した。切削条件を Table 1 に示す。切削距離 30 m 間隔で工具逃げ面を観察し、切削距離 210 m まで実験を行った。ただし、PCD 工具を用いた乾式切削は逃げ面摩耗幅が 0.3 mm に達するまで旋削を続けた。観察には光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用した。

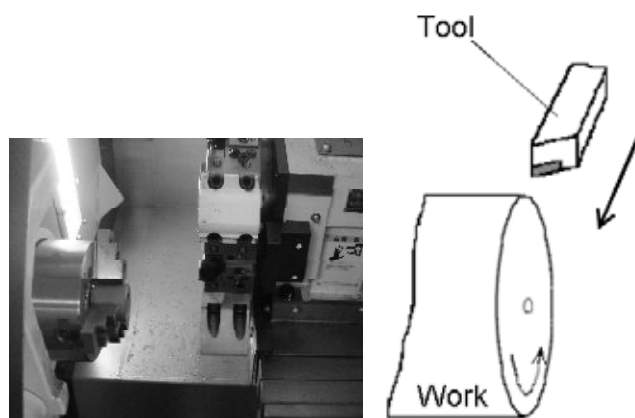


Fig. 1 NC lathe and operation area

Table 1 Cutting conditions

Tool	PCD	cBN
Cutting speed(m/min)	15	10
Feed rate(mm/rev)	0.1	
Depth of cut (mm)	0.1	
Cutting method	Dry, Wet	Dry

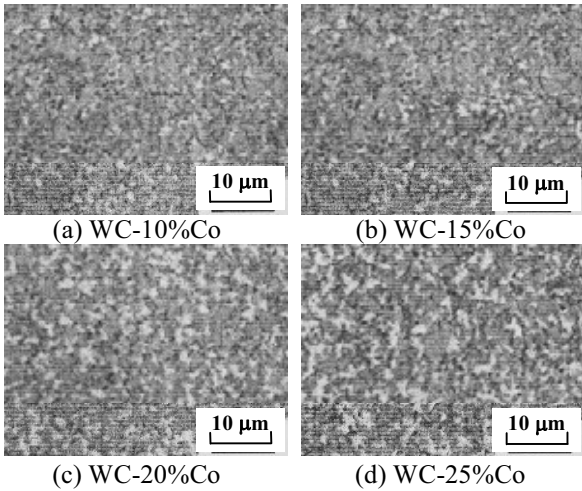


Fig. 2 Structures of cemented carbides (WC grain size : 2 μm)

Table 2 Mechanical properties of cemented carbides (WC grain size : 2 μm)

Cemented carbides	Specific gravity (g/m <sup>3</sup> )	Hardness (HRA)	Compressive strength (GPa)
WC-10%Co	14.55	89.4	3.57
WC-15%Co	14.05	87.3	3.54
WC-20%Co	13.60	85.4	3.49
WC-25%Co	13.15	83.6	3.24

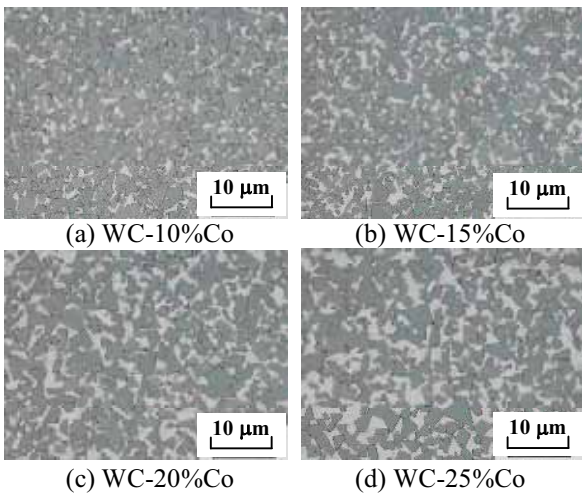


Fig. 3 Structures of cemented carbides (WC grain size : 7 μm)

Table 3 Mechanical properties of cemented carbides (WC grain size : 7 μm)

Cemented carbides	Specific gravity (g/m <sup>3</sup> )	Hardness (HRA)	Compressive strength (GPa)
WC-10%Co	14.47	86.3	3.02
WC-15%Co	13.98	84.7	3.02
WC-20%Co	13.53	82.5	2.83
WC-25%Co	13.10	81.5	2.73

**2.1 超硬合金** 被削材には WC 粒子径と Co 含有量が異なる 8 種類の超硬合金を使用した。超硬合金の WC 粒子径は平均して 2 μm と 7 μm に統一しており、それぞれ Co 含有量が 10, 15, 20, 25% である。以下、それぞれを WC-10%Co, WC-15%Co, WC-20%Co, WC-25%Co と表記する。被削材には全て内径 25 mm, 外径 50 mm の中空円筒材を使用した。

WC 粒子径 2 μm, 7 μm 超硬合金の光学顕微鏡による組織写真および機械的特性をそれぞれ Fig. 2, Fig. 3 と Table 2 と Table 3 に示す。

**2.2 工具** 工具には各工具材種がロウ付けされたスローアウェイチップを端面切削用ホルダ (Fig. 4) に取り付けしたものを用いた。それらの機械的特性について Table 4 に示す。焼結ダイヤモンド (PCD : Poly Crystalline Diamond) 工具は一般に広く使用されているものを、立方晶窒化ホウ素 (cBN : Cubic Boron Nitride) 工具には粒子径と結合相が異なる 4 種類を使用した。以下、cBN 工具はそれぞれ cBN1, cBN2, cBN3, cBN4 と表記する。なお、cBN2, cBN3, cBN4 工具には刃先にチャンファの加工が施されているものを用いた。

Table 4 Mechanical properties of tool materials

Tool	Grain contents (Vol%)	Grain size (μm)	Bonding material	Hardness (Hv)	Transverse rupture strength (GPa)
PCD	91	12.5	Co	10000	1.7
cBN1	80-90	3	Co	3900-4200	0.95-1.10
cBN2					
cBN3	50-60	3	TiN	3200-3400	0.95-1.10
cBN4		2			1.00-1.10

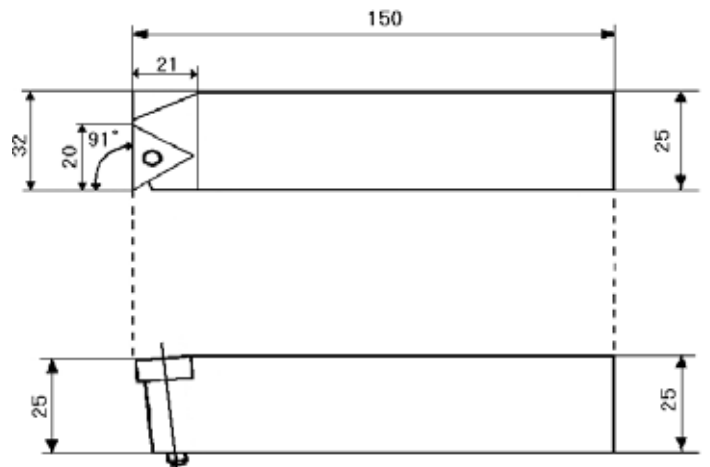


Fig. 4 Geometry of tool holder

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 PCD 工具・乾式切削

**3.1.1 工具逃げ面摩耗幅** WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$ , WC-25%Co 超硬合金を乾式切削したときの PCD 工具の逃げ面画像を Fig. 5 に例示する. 工具摩耗幅は切削距離 30 m 間隔で増加し, 摩耗形態としては切削方向に筋状となっていた.

PCD 工具を用いて, 4 種類の WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$  超硬合金を乾式切削し, 得られた切削距離と工具摩耗幅の関係を Fig. 6 に示す. 工具摩耗幅が 0.3 mm に達した時点を利用寿命とした場合, WC-25%Co > WC-20%Co > WC-15%Co > WC-10%Co の順に工具寿命に到達した. WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削では Co 含有量の変化に伴って工具摩耗幅に差が見られたのに対して, WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削においては Co 含有量が変わっても工具摩耗幅にほぼ差は見られなかった. したがって WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削では Co に起因した凝着物の脱落による摩耗機構よりも WC 粒子に起因した機械的な摩耗機構の方が顕著に影響したと考えられる.

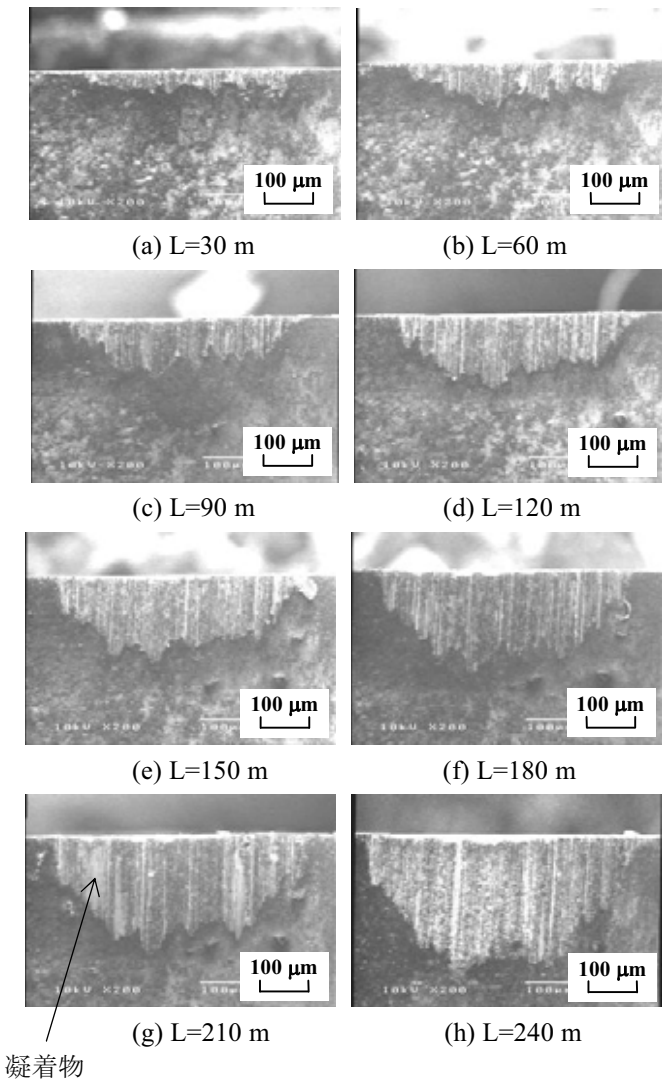


Fig. 5 SEM photographs of tool wear (WC grain size : 2  $\mu\text{m}$ , WC-25%Co, Dry)

Fig. 5(g)からも分かるように, 工具摩耗部には凝着物が見られる. 凝着物はどの条件下でも存在しており, その量は大きく変化している. すなわち, 摩耗は凝着物が着脱を繰り返すことにより増大したと考えられる.

PCD 工具を用いて, 4 種類の WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$  超硬合金を乾式切削し, 得られた切削距離と工具摩耗幅の関係を Fig. 7 に示す. この場合, 被削材が WC-15%Co > WC-25%Co > WC-20%Co > WC-10%Co の順に工具寿命に到達した. WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削では Co 含有量の変化に伴って工具摩耗幅に差が見られたのに対して, WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削においては Co 含有量が変わっても工具摩耗幅にほぼ差は見られなかった. したがって WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削では Co に起因した凝着物の脱落による摩耗機構よりも WC 粒子に起因した機械的な摩耗機構の方が顕著に影響したと考えられる.

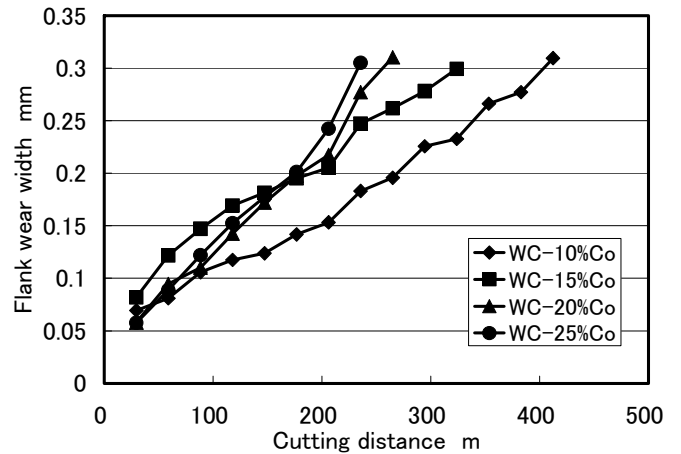


Fig. 6 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 2  $\mu\text{m}$ , PCD tool, Dry)

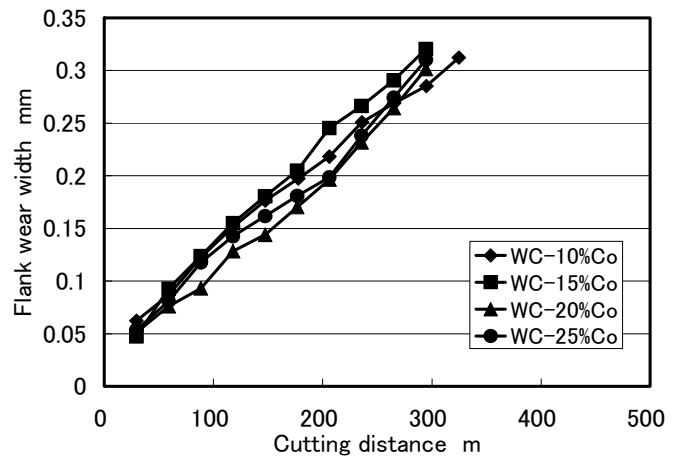


Fig. 7 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 7  $\mu\text{m}$ , PCD tool, Dry)

**3.1.2 工具逃げ面の凝着物** 切削後の工具摩耗部に凝着物が見られたことから、汎用の画像処理ソフトを用いて工具摩耗部の SEM 画像を二値化し、凝着面積および摩耗面積を測定した。得られた凝着面積を摩耗面積で除した凝着割合を求め、切削距離 30 m 間隔での凝着割合の変動について調べた。WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$  超硬合金の切削における切削距離に対する凝着割合の変動量を Fig. 8 に示す。Fig. 8 から一回の実験で削られる切削距離 30 m の間に凝着割合が大きく変動し、凝着物の着脱が生じていたことが分かる。Fig. 9 では切削距離 30 m 間の凝着割合の最大変動量を示しているが、工具摩耗の大きかった WC 粒子径 2  $\mu\text{m}$ , WC-20%Co と WC-25%Co 超硬合金では凝着割合の最大変動量が大きくなっていった。したがって、これらの被削材の切削では Co に起因した凝着物の脱落による摩耗機構が顕著に影響したことによって工具寿命が短くなったと考えられる。

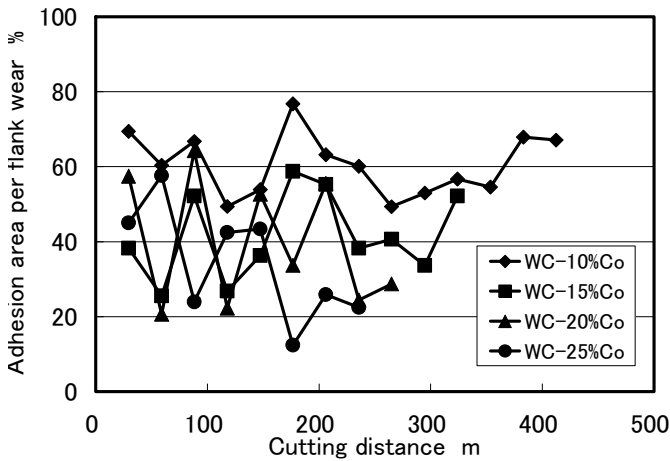


Fig. 8 Adhesion area per flank wear (WC grain size : 2  $\mu\text{m}$ , PCD tool, Dry)

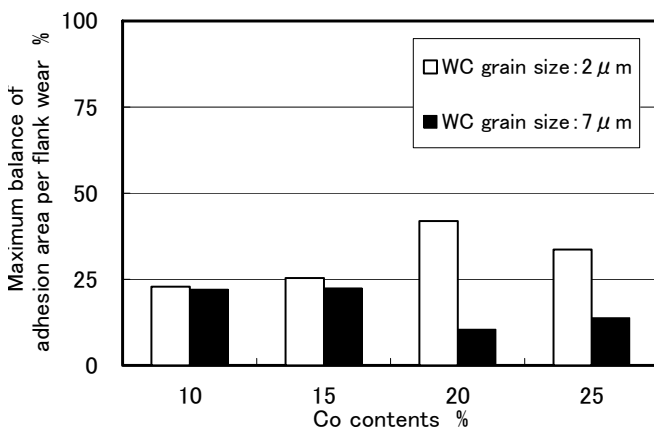


Fig. 9 Maximum balance of adhesion area per flank wear (PCD tool, Dry)

**3.1.3 仕上げ面粗さ** 切削距離 210 m における 8 種類の超硬合金の仕上げ面粗さを Fig. 10 に示す。仕上げ面には超硬合金の Co で覆われた層(被覆)の凝着が見られ、その凹凸が仕上げ面粗さに影響したと考えられる。

WC 粒子の割れによる影響を調べるため、切削後の超硬合金の仕上げ面観察を行った。しかし Fig. 11 (a) のように仕上げ表面には切削時に被覆した Co が存在し、WC 粒子を観察することが困難であった。そこで、Co を腐食する性質を持つメチルアルコールと硝酸の混合液を用いて、WC 粒子径 7  $\mu\text{m}$ , WC-15%Co の仕上げ表面において Co の腐食を行った。腐食前後の仕上げ表面および腐食後に発見した WC 粒子の割れの写真を Fig. 11 (c) に示す。WC 粒子の割れは切削時に工具と接触することで WC 粒子が破碎されたと考えられ、ひっかき摩耗を引き起こす要因<sup>(3)</sup>の一つと言える。

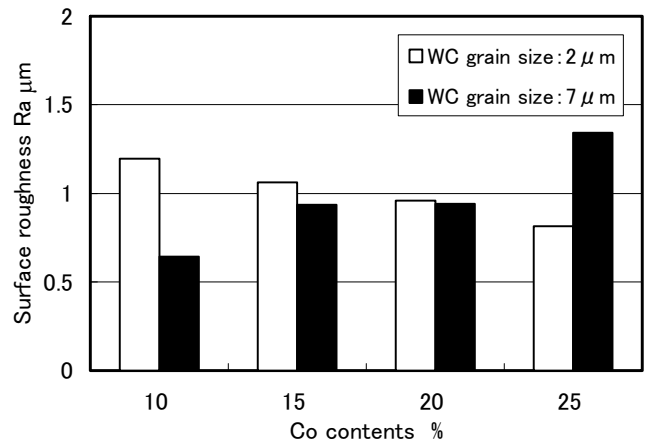


Fig. 10 Surface roughness (PCD tool, Dry, L=210 m)

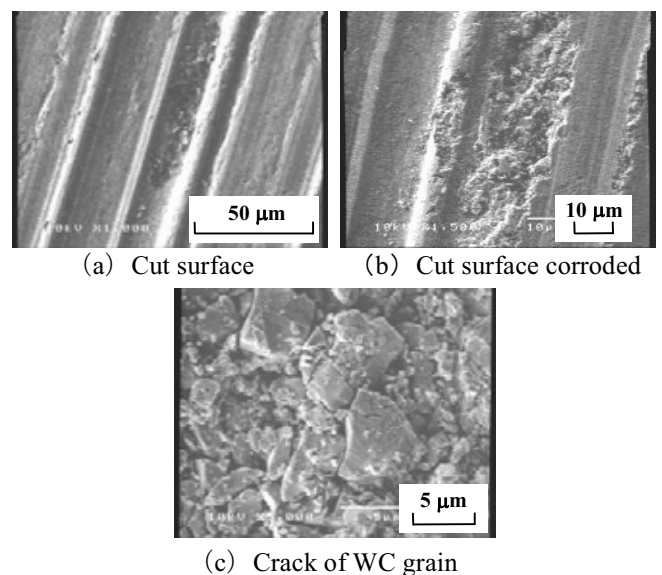


Fig. 11 Observation of cut surface and WC grain after cutting (WC grain size : 7  $\mu\text{m}$ , WC-15%CoPCD tool, Dry)

### 3.2 cBN 工具・乾式切削

**3.2.1 工具逃げ面摩耗幅と仕上げ面粗さ** cBN 工具を用いて、8 種類の超硬合金を乾式切削し、得られた切削距離と工具摩耗幅の関係を Fig. 11 と Fig. 12 に示す。2 種類の WC 粒子径どちらにおいても、切削距離 210 m での工具摩耗幅は WC-10%Co > WC-15%Co > WC-20%Co > WC-25%Co の順に大きかった。WC 含有量が多い超硬合金を切削するほど工具摩耗幅が大きくなったことから、WC 粒子による機械的な摩耗機構が顕著に影響したと考えられる。他の cBN 工具での結果は紙面の都合により割愛するが、それらの工具でも cBN1 工具と同様の傾向が見られた。

cBN1 工具を用いて、切削距離 210 m もしくは工具摩耗幅 0.3 mm に達した時点での 8 種類の超硬合金の仕上げ面粗さを Fig. 14 に示す。仕上げ面粗さは WC 粒子径に関係なく WC-10%Co > WC-15%Co > WC-20%Co > WC-25%Co の順に大きかった。工具摩耗幅も同様の順で大きかったことから、cBN1 工具では工具の摩耗状態が仕上げ面粗さに影響したことが分かった。

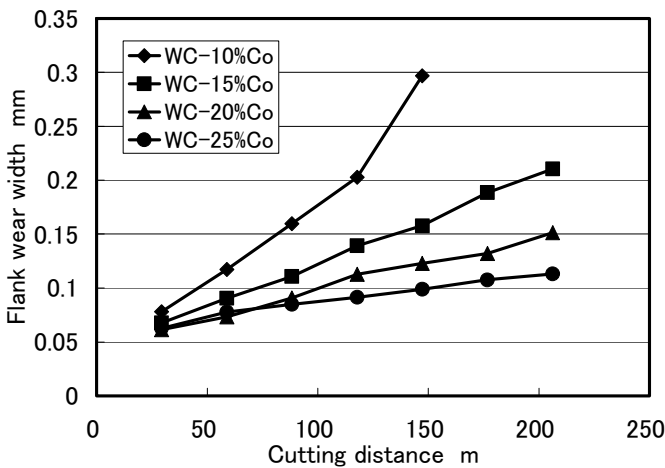


Fig. 12 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 2 μm, cBN tool, Dry)

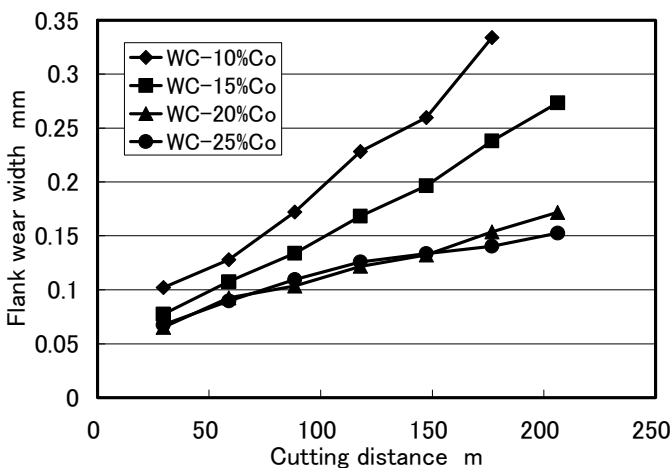


Fig. 13 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 7 μm, cBN tool, Dry)

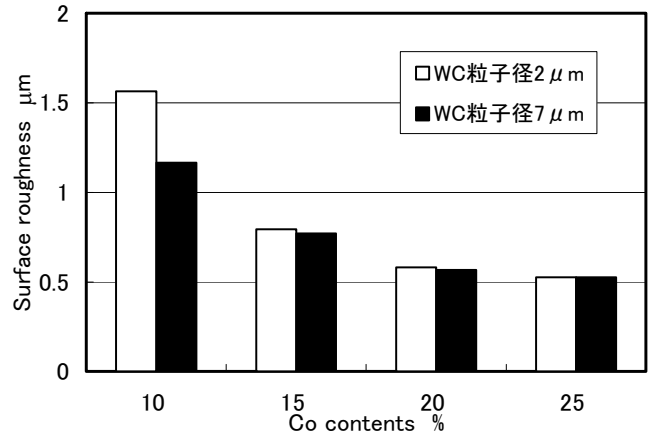


Fig. 14 Surface roughness (cBN tool, Dry, L=210 m or tool wear)

**3.2.2 cBN 工具と PCD 工具の比較** PCD 工具と 4 種類の cBN 工具を用いて、WC 粒子径 2 μm, WC-25%Co 超硬合金を切削し、得られた切削距離と工具摩耗幅の関係を Fig. 14 に示す。工具の初期摩耗は cBN3 > cBN4 > cBN2 > cBN1 > PCD の順に大きく、切削距離 30 m から切削距離 210 m までの工具摩耗幅の増加率は PCD 工具が最も大きかった。また、cBN 工具の中では cBN1 工具の摩耗幅が最も小さかったことから、刃先にチャンファの加工を施すと逆に工具寿命が短くなることが分かった。

PCD 工具を用いた WC 粒子径 2 μm 超硬合金の切削では、Co 含有量の違いによる初期摩耗に差は見られず、Co 含有量が増加するほど工具摩耗幅の増加率が大きくなった (Fig. 6)。一方、cBN 工具では Co 含有量が増加するほど工具摩耗幅が小さくなった (Fig. 12)。その結果、Co 含有量の多い超硬合金の切削では PCD 工具よりも cBN 工具の方が工具寿命が長くなる場合があり、切削条件によっては cBN 工具を用いた切削が有効<sup>(4)</sup>であることを示している。

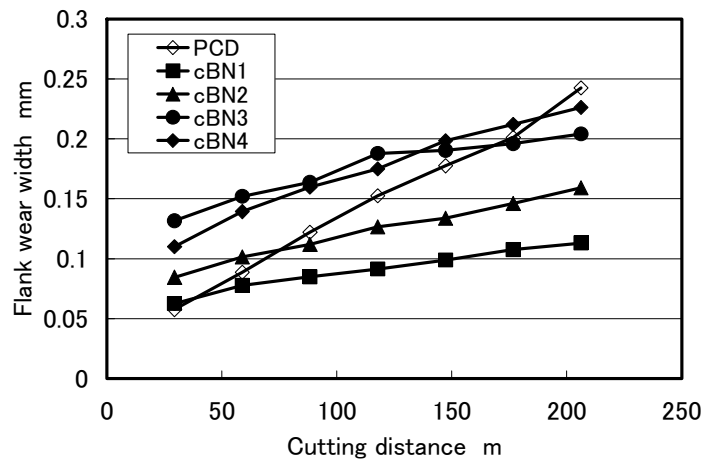


Fig. 15 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 2 μm, WC-25%Co, Dry)

**3.3 PCD 工具・湿式切削** PCD 工具を用いて、8 種類の超硬合金を湿式切削し、得られた切削距離と工具摩耗幅の関係を Fig. 15 に示す. WC 粒子径 2 μm と 7 μm 超硬合金の切削における工具摩耗幅を比較すると、大きさはほぼ同じであり、Co 含有量の影響についても同じ傾向となった。また、WC 粒子径 7 μm 超硬合金においては、乾式切削 (Fig. 7) と比較すると Co 含有量が増加するほど工具摩耗幅が大きくなる傾向にあることから、湿式切削では機械的な摩耗機構が軽減され、凝着による摩耗機構が顕著に影響したと考えられる。

一方、乾式切削と比較して WC 粒子径 7 μm, WC-10%Co 超硬合金の切削を除いて工具摩耗幅は増加した。許ら<sup>(5), (6)</sup>が行った冷風切削の実験においても同じく工具摩耗幅が増加したことから、湿式切削による冷却効果により工具摩耗幅が増大したと推測される。

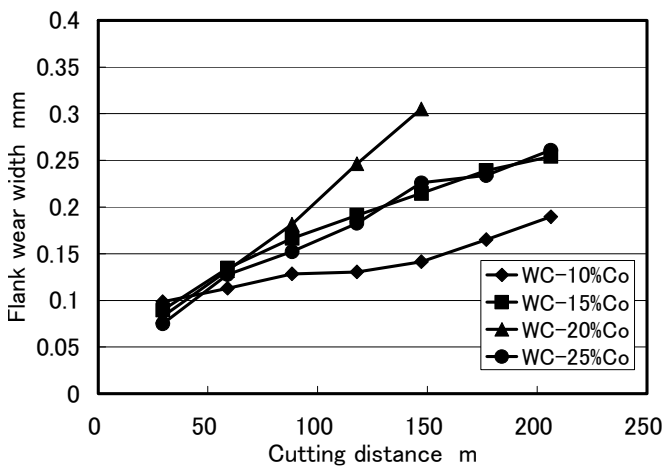


Fig. 16 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 2 μm, PCD tool, Wet)

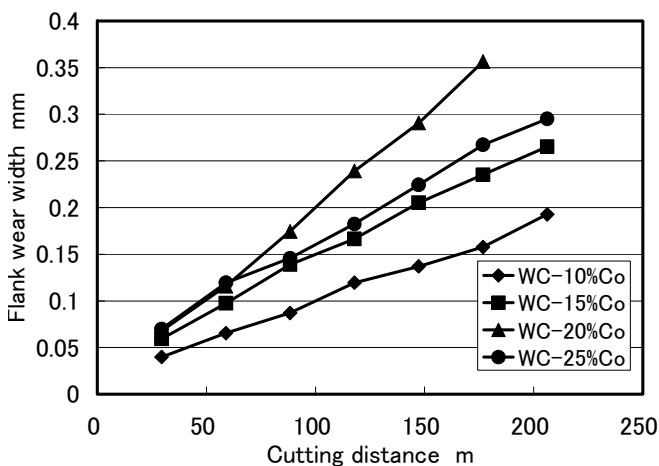


Fig. 17 Relation between cutting distance and flank wear width (WC grain size : 7 μm, PCD tool, Wet)

**4. 結言**

WC 粒子径を 2 μm と 7 μm に統一し、それぞれ WC-10%Co, WC-15%Co, WC-20%Co, WC-25%Co の計 8 種類の超硬合金を PCD 工具および 4 種類の cBN 工具を用いて端面切削した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) PCD 工具を用いた WC 粒子径 2 μm の超硬合金の乾式切削では、Co 含有量が多い順に工具摩耗幅が増加した。工具摩耗幅が大きかった WC-20%Co, WC-25%Co 超硬合金の切削では摩耗部の凝着物の凝着割合の変動が大きく、凝着物の脱落による摩耗機構が顕著に影響したと考えられる。
- (2) PCD 工具を用いた WC 粒子径 7 μm の超硬合金の乾式切削では、Co 含有量が変わっても工具摩耗幅に差は見られなかった。WC-15%Co 超硬合金の仕上げ面では WC 粒子の割れが生じていたことから、機械的な摩耗機構が主たる摩耗要因であったと考えられる。
- (3) PCD 工具を用いた湿式切削では、WC 粒子径それぞれについて差は見られず、工具摩耗幅は乾式切削より大きくなる傾向があった。
- (4) 切削条件によって PCD 工具よりも cBN 工具を用いた方が工具寿命が長くなる場合があった。

**謝辞**

本研究で使用した超硬合金は、(株)シルバーロイのご協力により作成して頂きましたことを付記し、謝意を表します。

**参考文献**

- (1) 許盛中, 宮本猛, 花崎伸作, 藤原順介: 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—, 精密工学会誌論文集, vol69, No.12, pp. 1724-1728, 2003.
- (2) 天野祥毅, 藤原順介: 耐摩耗・耐衝撃工具用超硬合金の切削加工に関する研究, 大阪大学, 平成 16 年度修士論文.
- (3) 許盛中, 宮本猛, 花崎伸作, 藤原順介, : 耐摩耗・耐衝撃工具用超硬合金の SEM 内微小切削, 精密工学会誌論文集, Vo71, No7, pp. 926-930, 2005.
- (4) 加工データファイル, (財) 機械振興協会技術研究所, 95-0325, 1997.
- (5) 許盛中, 宮本猛, 花崎伸作, 藤原順介, 天野祥毅: 耐摩耗工具用超硬合金における切削油の効果, 精密工学会誌論文集, Vo73, No8, pp. 896-900, 2007.
- (6) Miyamoto, T. et al. : Influence of WC and Co on Machinability in Mist and Dry Cutting of Cemented Carbides, ICPMT, pp. 17-20, 2006.