

マイクロ波プラズマ CVD 法により製造された ダイヤモンドコーテッドセラミック工具の 切削性能とその摩耗

白杵 年, 鳴瀧 則彦, 伊藤 利通, 山根八洲男

Wear Characteristics and Cutting Performance of Diamond Coated Ceramic Tools
Synthesized by Microwave Plasma CVD Method

Hiroshi USUKI

*Dept. of Natural Resources Process Engineering,
Faculty of Science and Engineering, Shimane University*

Norihiko NARUTAKI

Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University

Toshimichi ITOH

Idemitsu Petrochemical Co. Ltd.

Yasuo YAMANE

Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University

(Received September 19, 1997)

Abstract

By using the plasma CVD method with hydrocarbon and carbon monoxide gas mixtures with hydrogen, a synthesized diamond film was deposited on cutting tools. In order to clarify the wear characteristics and cutting performance of the diamond coated tools, turning tests were carried out on Al-Si alloy, carbon fibre reinforced polymer (CFRP), glass fibre reinforced polymer (GFRP), and titanium alloy. The diamond coated tools were found to have a cutting performance equal to that of sintered diamond tools when machining materials which did not present the greatest cutting difficulties such as low Si Al alloys, GFRP and CFRP. However, when machining high Si Al alloys, the synthesized diamond film showed a cutting performance inferior to that of sintered diamond tools.

1. 緒 言

ダイヤモンドは、その優れた硬度特性とシャープエッジが得られるために、ある特定の切削状況下において最も良好な工具材料の一種である。そのため、ダイヤモンド切削工具は、非鉄・非金属系の各種材料の加工に幅広く使用されている。しかしダイヤモンドは、脆く、へき開性を有し、高温下において化学的に不安定であり、また工具コストが高いなどの欠点を持っている。ただし、この脆さと化学的不安定性は、注意深く切削条件を選択してやれば、それ程問題とならないが、コストは著しく下げることができない。したがって、ダイヤ

モンド工具を使用して加工する場合には加工コストに十二分な考慮を払わなければならない。

ところで、ダイヤモンド工具の製造方法には、天然産ダイヤモンドの使用と高温・高圧技術による人造ダイヤモンドを用いた単結晶ダイヤモンド工具、焼結ダイヤモンド工具の他に、気相合成技術による薄膜ダイヤモンドを用いた多結晶ダイヤモンド工具、ダイヤモンドコーテッド工具¹⁻⁵⁾がある。このダイヤモンドコーテッド工具は、安価なダイヤモンド系工具として工具コストの低減への寄与が期待できる。

本研究では、ダイヤモンドコーテッドセラミック工具の切削性能および摩耗特性を明らかにする目的で、Al-Si合金、繊維強化プラスチック(GFRP, CFRP)、チタン合金などを旋削加工した。そしてダイヤモンドコーティング膜の製造方法の検討やダイヤモンド膜の摩耗特性、各種被削材切削時の工具性能を焼結ダイヤモンド工具と比較しながら検討した。

2. ダイヤモンド膜の合成方法

薄膜ダイヤモンドの製造方法には、マイクロ波プラズマCVD法、熱フィラメント法、イオンビーム蒸着法などがあるが、本実験ではマイクロ波プラズマCVD法を用いた。合成装置の概略図をFig. 1に示す。この方法では、原料ガスのプラズマ状態を得るためにマイクロ波を使用するが、他の方法に比べ高純度のダイヤモンド膜を得やすく、合成が比較的安定しているなどの利点がある。

Table 1は、様々な母材材質、合成条件でダイヤモンドの合成を行ったときの結果を比較した1例である。母材としては、切削工具の基本特性として高硬度が要求されるので、既存の切削工具材種を選択した。なお、表中の傷つけ処理は、ダイヤモンド粉末(約 $1\mu\text{m}$)を含んだ超音波浴中で行った。また原料ガスは、一般に炭化水素系ガス(メタン, エタン, アセチレン, アルコールなど)あるいは炭素を含むガス(一酸化炭素など)であればダイヤ

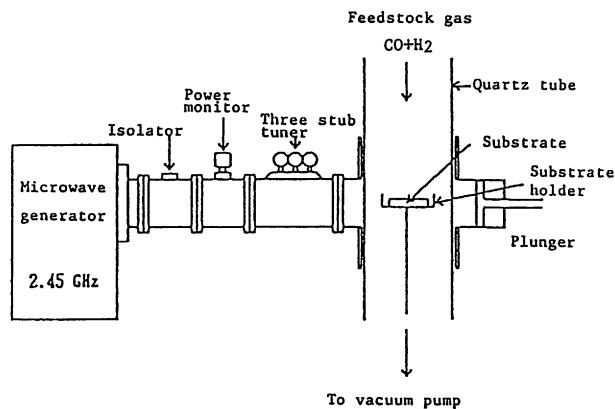


Fig. 1 Microwave Plasma CVD apparatus

Table 1 Comparison of suitability of substrate materials for diamond coating

Substrate	Surface preparation	Feed gas composition, vol.-%	Temperature, K	Time, h	Form in which diamond overlies substrate	Adhesion*
Al ₂ O ₃	Unscratched	H ₂ -0.5CH ₄	1153	24	Grain	...
Al ₂ O ₃	Scratched	H ₂ -0.5CH ₄	1153	24	Film	Poor
Al ₂ O ₃	Scratched	H ₂ -0.5CH ₄	1173	6	Grain	...
TiC	Unscratched	H ₂ -0.5CH ₄	1183	24	Grain	...
TiN cermet	Unscratched	H ₂ -0.5CH ₄	1183	24	Film	Poor
TiCN cermet	Unscratched	H ₂ -0.3CH ₄	1183	3	Grain	...
TiCN cermet	Unscratched	H ₂ -0.5CH ₄	1173	24	Film	Poor
Al ₂ O ₃ /SiC _w	Scratched	H ₂ -7CO	1173	1	Film	Good
SiC	Unscratched	H ₂ -7CO	1173	3	Grain	...
SiC	Scratched	H ₂ -7CO	1173	6	Film	Good
WC-Co	Scratched	H ₂ -10CO	1183	3	Film	Good
TiCN/WC	Scratched	H ₂ -7CO	1173	3	Film	Moderate
Al ₂ O ₃ /TiC/WC	Scratched	H ₂ -7CO	1173	3	Film	Poor
Al ₂ O ₃ /TiCN/WC	Scratched	H ₂ -7CO	1173	3	Film	Moderate
TiN/Al ₂ O ₃ /WC	Scratched	H ₂ -7CO	1173	3	Film	Moderate
Si ₃ N ₄	Scratched	H ₂ -7CO	1163	10	Film	Good

*Poor = separation of diamond film during cooling after synthesis; moderate = peeling off of deposited film immediately after commencing cutting; good = no immediate separation of film during cutting with coated tool.

モンドの合成は可能である⁶⁾。そして通常気相合成が行われる 1 気圧以下の圧力は、黒鉛の安定相であるため、ダイヤモンドと同時に黒鉛が析出する可能性がある。この気相中に発生した黒鉛を取り除きながらダイヤモンドを成長させるために水素ガスが用いられる。したがって、上記ガスと水素ガスとの混合ガスが原料ガスとして使用される。本実験では、原料ガスとしてメタンと水素の混合ガス (H₂-CH₄) と一酸化炭素と水素の混合ガス (H₂-CO) を用いた。ダイヤモンド膜の合成に関して Table 1 から得られた結論は、以下の通りである。

1) 母材表面に対して行う傷つけ処理は、核発生密度を向上させ、ダイヤモンド膜を生成させるためには必要である。もし、傷つけ処理を行わなかったならば、合成したダイヤモンドは膜状にならないか、膜状になったとしても密着強度は非常に低い。ダイヤモンド膜を得るためには、多数のダイヤモンド核が表面に付着する必要がある、傷つけ処理によって表面に付けられた傷は、ダイヤモンドの核生成と成長に不可欠である。

2) 切削工具として重要な要求項目である母材とダイヤモンド膜の密着強度が不足しているため、Al₂O₃ セラミック工具とサーメット工具は母材材質として適切な材料ではない。ダイヤモンド膜を母材に強固に付けるためには、ダイヤモンド膜と母材の界面での一般的特性として、母材の膨張係数がダイヤモンドに近いこと、母材材質が炭化物を生成しやすいこと、さらに母材中に炭素 (C) が拡散しにくいことなどが挙げられる。Al₂O₃ セラミックは、ダイヤモンドの熱膨張係数が 0.8×10⁻⁶ K⁻¹ に対して、7.8×10⁻⁶ K⁻¹ と大きく、サーメットは炭素を容易に拡散するメタルバインダーを有しているために不適切である。

3) H₂-CO ガスは、H₂-CH₄ ガスに比べダイヤモンド膜の成長速度が速く、また広い CO ガス濃度範囲でダイヤモンド膜の合成が可能である⁷⁾。

以上の予備実験の結果から、母材材質として超硬 (WC-Co) と窒化けい素 (HPSN) 工具を選択した。また原料ガスとしては、H₂-CO ガスを原料ガスとして採用し、以下の実験ではこの原料ガスを使用して工具を製造し、その切削性能を評価した。

3. ダイヤモンドコーテッド工具用母材材質の選択

最適の母材材質と合成条件を決定するために、Table 2 に示す合成条件で工具を製作し、一連の実験を行った。合成は、基盤温度を赤外線放射温度計で監視しながら一定値に保つようにマイクロ波出力（平均 400 W）をコントロールした。なお、Table 2 の全ての条件下でダイヤモンド膜の合成は可能であった。Fig. 2 に各条件下で合成したダイヤモンドコーテッ

Table 2 Conditions of diamond film synthesis

Tool code†	Carbide substrate		Silicon nitride substrate				
	DCSC1	DCSC2	DCSN1	DCSN2	DCSN3	DCSN4	DCSN5
Source gas CO concentration, vol.-%	10	10	7	7	15	15	15
Synthesising time, h	3	3	10	20	10	10	5
Substrate temperature, °C	910	900	890	1000	1000	1000	1000
Coated film thickness, μm	3‡	10‡	3‡	20	20	20	10

*Source gas = CO-H₂; gas flowrate = 100 cm³ min⁻¹ (STP); gas pressure = 5333 Pa.

†See Table 3.

‡These values correspond to one crystal thickness.

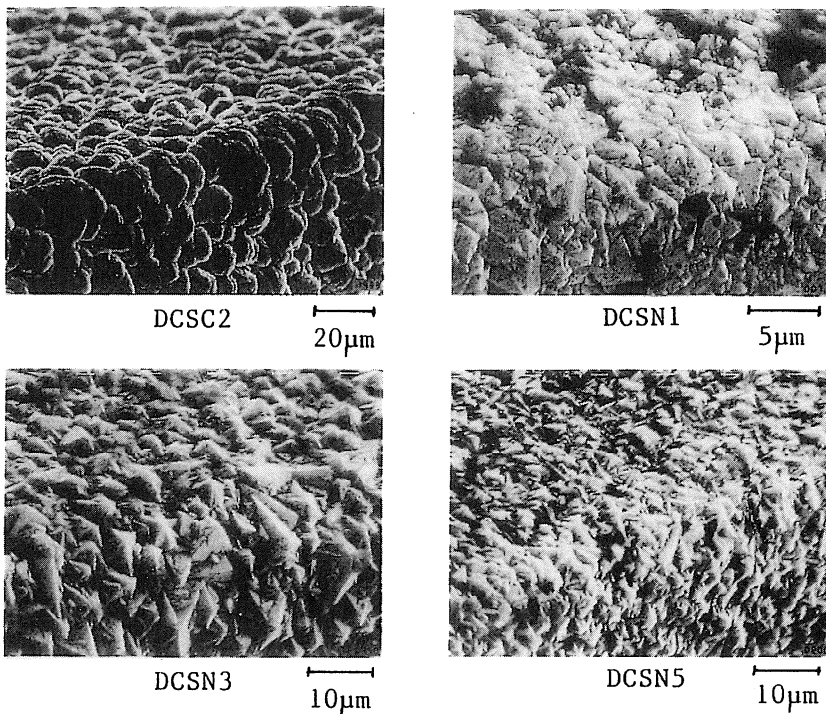
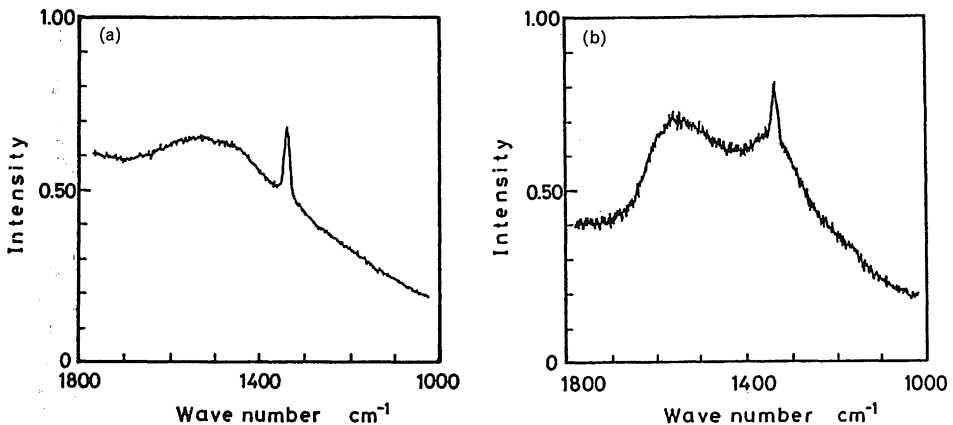


Fig. 2 Typical surface of diamond film coatings

ド工具の工具切刃近傍の SEM 写真を示す。いずれもダイヤモンド結晶の特徴的な形状を示しており、ダイヤモンド結晶の粒径は、3~10 μm である。Fig. 3 は、代表的な合成条件で合成したダイヤモンド膜のラマン分光分析結果である。1332 cm^{-1} に見られる鋭いピークは、ダイヤモンド固有のピークで、1360~1600 cm^{-1} の緩やかなピークはアモルファスカーボンのピークである。図より、15 vol%CO 濃度で合成した膜は、7 vol%CO で合成した膜よりもアモルファスカーボンのピークがはっきりとでてきていることから、7 vol%CO で合成した方がより純度の高いダイヤモンド膜が得られることがわかる。なお、CO を原料ガスに使用した場合、高純度のダイヤモンド膜は CO 濃度 5~7 vol% で得られる。また超硬母材に合成した場合 (Fig. 2) には、合成されたダイヤモンド膜はダイヤモンド粒子形状的に劣る傾向が見られ、ラマン分光分析から多量のアモルファスカーボンを含んでおり、超硬中への炭素の拡散係数が高いことが原因と考えられる。

これら Table 2 に示した工具のダイヤモンド膜の母材への密着性を評価するために、Table 3 に示す切削条件下で旋削実験を行った。被削材は、Al-Si 合金、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) とカーボン繊維強化プラスチック (CFRP) を用いた。これらの被削材は、切削抵抗は低いが、難削材料として知られているものである。

Fig. 4 に Al-Si 合金と GFRP を切削したときの典型的なダイヤモンドコーテッド超硬工具の切刃部の写真を示す。写真から、切刃近傍のダイヤモンド膜は剝離しているのが観察できる。また、超硬を母材として使用した場合には、本実験のいずれの合成条件においても剝離を生じた。なお、超硬母材に実用的な工具性能が得られるダイヤモンド膜を合成するためには特別な工夫が必要である⁸⁾。これに対して、窒化けい素セラミックを母材とした場合には、ダイヤモンド膜の剝離は見られず、ダイヤモンド膜は優れた耐摩耗性を示している。Fig. 5 は、Al-Si 合金を 50 min 間切削した後のダイヤモンドコーテッド窒化けい素工具の



a DCSN1 (H_2 -7 vol.-%CO); b DCSN3 (H_2 -15 vol.-%CO); see Table 3

Fig. 3 Raman spectra of diamond films

Table 3 Cutting conditions of turning tests

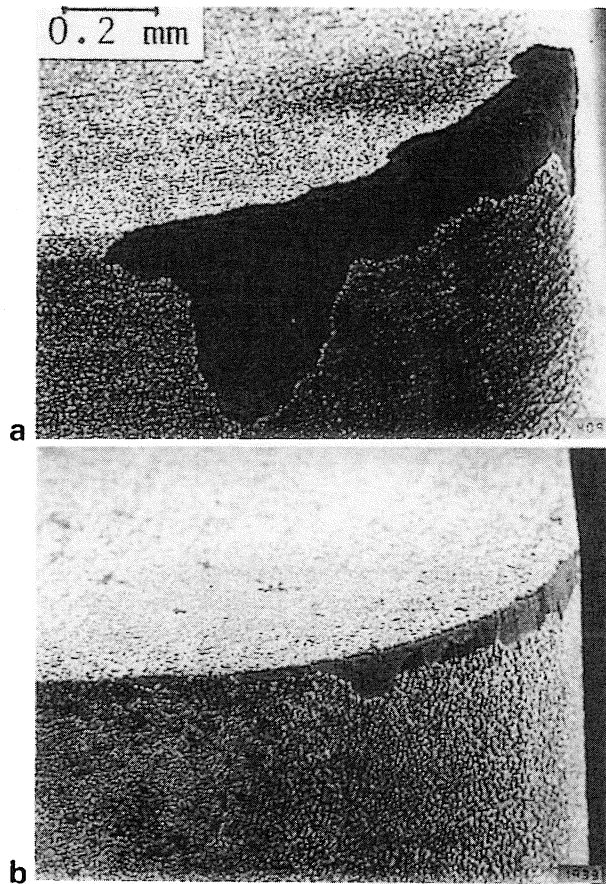
Tool material	Diamond coated carbide (DCSC1 and DCSC2) Diamond coated silicon nitride (DCSN1 ~ DCSN5) Sintered diamond Carbide (WC-6%Co (JIS K10)) Silicon nitride	Unchamfered Chamfer: $0.1 \times 30^\circ$ Chamfer: $0.08 \times 30^\circ$ Unchamfered Chamfer: $0.1 \times 30^\circ$
Workpiece material	Al alloy (8, 10, 12 and 18 vol% Si content) CFRP (52 and 60 vol% carbon fibre content) GFRP (20 and 60 vol% glass fibre content) Ti-6Al-4V (as rolled)	
Cutting speed, m min ⁻¹	100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1500 (for Al alloy) 100, 200, 400, 600, 800 (for CFRP and GFRP) 90, 120, 150 (for Ti-6Al-4V)	
Depth of cut, mm	0.5 ~ 3.0 (for Al alloy) 0.5 ~ 2.0 (for CFRP and GFRP) 0.2 ~ 0.5 (for Ti-6Al-4V)	
Feed rate, mm rev ⁻¹	0.01 ~ 0.3 (for Al alloy) 0.05 ~ 0.3 (for CFRP and GFRP) 0.05, 0.1 (for Ti-6Al-4V)	
Tool geometries	Rake angles -5° (end), -6° (side); Clearance angles 5° (end), 6° (side); Cutting edge angles 15° (end and side); Nose corner radius 0.8 mm	
Cutting fluid	Emulsion type (JIS W1-2, dilution $\times 50, \times 30$)	

切刃部の一例である。

窒化けい素セラミックが超硬よりも良い結果を得た理由として、以下に述べる2つの理由が考えられる。1つは、ダイヤモンド、窒化けい素、超硬の熱膨張率がそれぞれ 0.8×10^{-6} , 2×10^{-6} , $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ と、窒化けい素の熱膨張率がダイヤモンドに近いことが考えられる。切削中、工具切刃のダイヤモンド膜は数百°Cに熱せられる。Fig. 6は、Al-8 vol%Si合金をコーティングした超硬工具と未コーティングの超硬工具（超硬材質は同一）で切削している時の工具-被削材間熱電対法により計測された熱起電力を比較したものである。両条件ともほぼ同じ程度の熱起電力を生じている。この時の工具刃先平均切削温度は、約550°Cに相当する。このことから、母材とコーティング膜の熱膨張係数が非常に異なっていると、熱応力を大きく生じ、コーティング膜が剥離しやすくなると考えられる。

第2に、超硬工具はバインダーにコバルト (Co) を含んでいる。ダイヤモンド膜を超硬上にコーティングするためには、通常工具表層付近のコバルトを酸などで除去しなければならない。(ダイヤモンド膜の密着性を良くする目的で、表層部に炭化物が生成しやすいように工具表層部に脱炭処理などの前処理を施し、表層にコバルトのない母材が使用されている^{10,11}.) これは、工具表面に炭素の拡散係数の大きなコバルトがあると、表面に付着したダイヤモンドの構成元素である炭素が工具中に拡散し、膜状ダイヤモンドが生成しないためである。これに対して、窒化けい素母材には、炭素を簡単に拡散するような金属系のバインダーは含まれていない。

以上の実験結果から、母材材質に窒化けい素セラミックを選び、各種被削材切削時のダイヤモンドコーテッド窒化けい素工具の切削性能、摩耗特性を評価した。



a; Tool DCSC1, Workpiece GFRP (20 vol% glass fibre),
L=200 m

b; Tool DCSC2, Workpiece Al-8 vol%Si, L=500 m

Fig. 4 Wear patterns of diamond coated carbide tool in
machining of Al alloy and GFRP

$V=100 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm rev}^{-1}$, wet
cutting

4. ダイヤモンドコーテッド窒化けい素工具の切削性能

Fig. 7 に、各種被削材を 2 種類のダイヤモンドコーテッド窒化けい素工具、超硬工具および焼結ダイヤモンド工具を用いて図中に示す切削条件下で切削距離 10000 m 切削した時点の逃げ面最大摩耗量を比較した結果を示す。高 Si 含有のアルミ合金 (Al-18 vol%Si) を除く Si 含有量 12 vol% 以下のアルミ合金、GFRP (60 vol% ガラス繊維含有) や CFRP (52

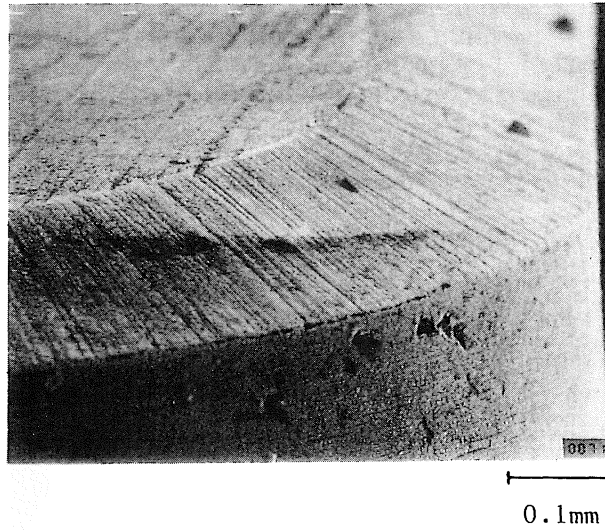


Fig. 5 Wear patterns of diamond coated Silicon nitride tool DCSN1 after cutting Al-8 vol%Si alloy for 50 min
 $V=200 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm rev}^{-1}$,
 $L=10000 \text{ m}$, wet cutting

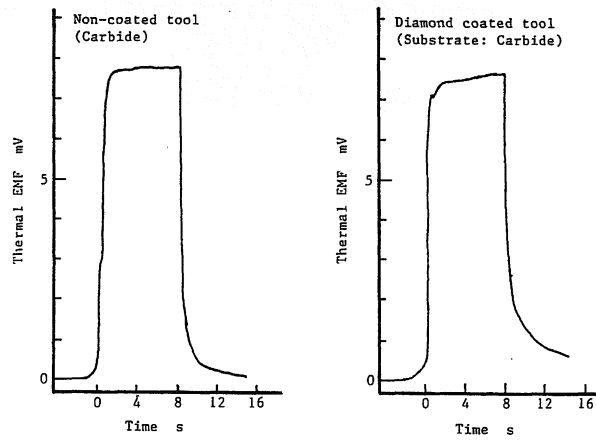
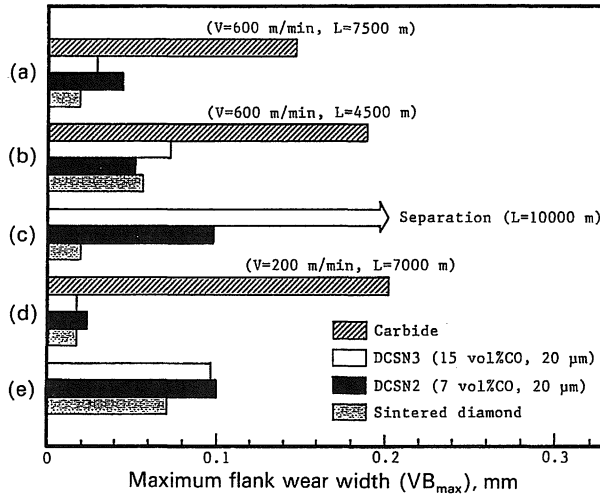


Fig. 6 Thermal EMF measured during cutting of Al-8 vol% Si with uncoated and diamond coated carbide tools
 $V=600 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.2 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm rev}^{-1}$, wet cutting



(a); Al-8 vol%Si, $V=1500 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm rev}^{-1}$, $L=10000 \text{ m}$: (b); Al-12 vol%Si, $V=1500 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm rev}^{-1}$, $L=10000 \text{ m}$: (c); Al-18 vol%Si, $V=1500 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.2 \text{ mm}$, $f=0.01 \text{ mm rev}^{-1}$, $L=10000 \text{ m}$: (d); GFRP (60 vol% glass fibre), $V=600 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm rev}^{-1}$, $L=10000 \text{ m}$: (e); CFRP (52 vol% carbon fibre), $V=100 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm rev}^{-1}$, $L=1000 \text{ m}$

(a); Al-8 vol%Si, $V=1500 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm rev}^{-1}$, $L=10000 \text{ m}$: (b); Al-12 vol%Si, $V=1500 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm rev}^{-1}$, $L=10000 \text{ m}$: (c); Al-8 vol%Si, $V=1500 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.2 \text{ mm}$, $f=0.01 \text{ mm rev}^{-1}$, $L=10000 \text{ m}$: (d); GFRP (60 vol% glass fibre), $V=600 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm rev}^{-1}$, $L=10000 \text{ m}$: (e); CFRP (52 vol% carbon fibre), $V=100 \text{ m min}^{-1}$, $d=0.5 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm rev}^{-1}$, $L=1000 \text{ m}$

Fig. 7 Comparison of flank wear width of various tools during machining of various work materials under wet cutting conditions

vol%炭素繊維含有)を切削した場合には、試作したダイヤモンドコーテッド窒化けい素工具は、焼結ダイヤモンド工具とほぼ同じ摩耗量を示し、超硬工具よりもはるかに小さな摩耗となっている。しかし、18 vol%Siのアルミ合金切削時には、15 vol%COの原料ガスで合成した工具にダイヤモンド膜の剝離を生じている。これに対して、7 vol%COの原料ガスで合成した工具では、剝離を生じることなく切削することができている。しかし、その摩耗幅は、焼結ダイヤモンド工具の約5倍になっている。

Fig. 8 は、Ti-6Al-4Vをダイヤモンドコーテッド工具 (DCSN-3, 15 vol%CO) 及び焼結

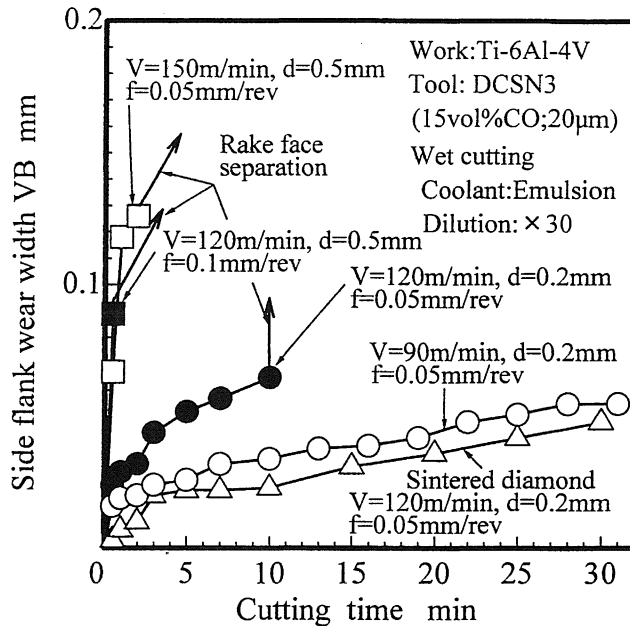
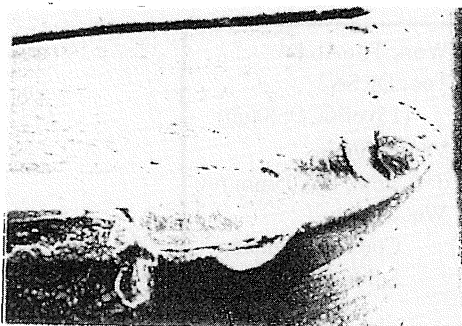


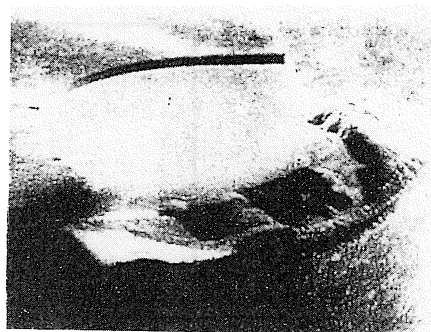
Fig. 8 Effect of cutting conditions on tool wear in machining of titanium alloy

ダイヤモンド工具で湿式切削したときの摩耗進行線図である。ダイヤモンドコーテッド工具は、 $V=90\text{ m/min}$, $d=0.2\text{ mm}$, $f=0.05\text{ mm/rev}$ の条件下では剥離することなく $T=31\text{ min}$ まで切削可能であったが、それよりも切削条件の厳しい他の条件下ではいずれもすくい面に剥離を生じている。また逃げ面の摩耗進行状況を見ると、摩耗自体の進行は切削条件の軽いところではかなり緩やかで、比較した焼結ダイヤモンド工具とあまり大差のない状況になっている。なお、ダイヤモンド膜の密着性が不足して剥離を生じる場合は、逃げ面側に起こることがほとんどであることから、このすくい面の剥離は、チタン合金切削時特有の現象に起因していると考えられる。

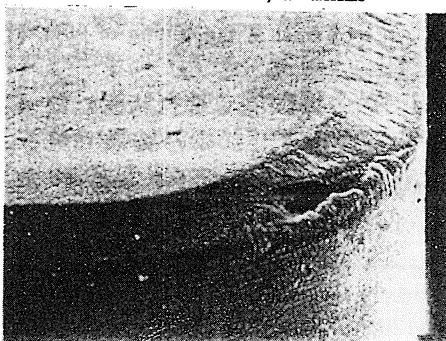
Fig. 9は、この時のダイヤモンドコーテッド工具と焼結ダイヤモンド工具の摩耗形態写真である。写真から、ダイヤモンドコーテッド工具の場合には、チャンファ内であるがすくい面に僅かなクレータ摩耗が観察される。すくい面に剥離を生じた条件では、このクレータ摩耗がある程度大きくなった直後に剥離する傾向が見られた。また焼結ダイヤモンド工具にはほとんどクレータ摩耗が生じなかったことから、ダイヤモンドコーテッド工具の場合には、ダイヤモンド膜が薄いために刃先部の切削熱を十分に放熱できないことが考えられる。一方、逃げ面の摩耗は非常にわずかで、焼結ダイヤモンド工具と大差のない形態になっている。したがって、このクレータ摩耗の発生を抑えれば、逃げ面の摩耗が小さいことから実用的な加工も可能でると考えられる。



Tool:DCSN-4
 V=150m/min, d=0.5mm
 f=0.05mm/rev, T=2min



Tool:DCSN-4
 V=120m/min, d=0.2mm
 f=0.05mm/rev, T=10min



Tool:DCSN-4
 V=90m/min, d=0.2mm
 f=0.05mm/rev, T=31min

0.2mm

Workpiece Ti-6Al-4V, Wet cutting (Emulsion × 30)

Workpiece Ti-6Al-4V, Wet cutting (Emulsion × 30)

Fig. 9 Wear patterns of diamond coated tool when machined titanium alloy

そこで、このクレータ摩耗を押さえる目的で、工具刃先を十分に冷却するために高圧での給油を行った。Fig. 10にすくい面上方から圧力 30 Kgf/cm² で高圧給油を行った結果を示す。流下式給油では、V=120 m/min, d=0.2 mm, f=0.05 mm/rev の条件下で T=10 min で剥離を生じているのに対して、高圧給油を行うとクレータ摩耗の進行が抑えられるために、T=22 min まで剥離までの時間が伸びている。また逃げ面の摩耗進行も緩やかになり、刃先部の十分な冷却がすくい面のダイヤモンド膜の剥離抑制に効果があることがわかる。

また工具寿命を延長する方法として、ダイヤモンド膜の密着性に優れる高純度のダイヤモンド膜を使用することが考えられる。Fig. 11に、ダイヤモンド膜の膜質の異なる 2 種類の工具の摩耗進行を比較した結果を示す。DCSN-3 が 15 vol%CO で合成したもの、DCSN-2

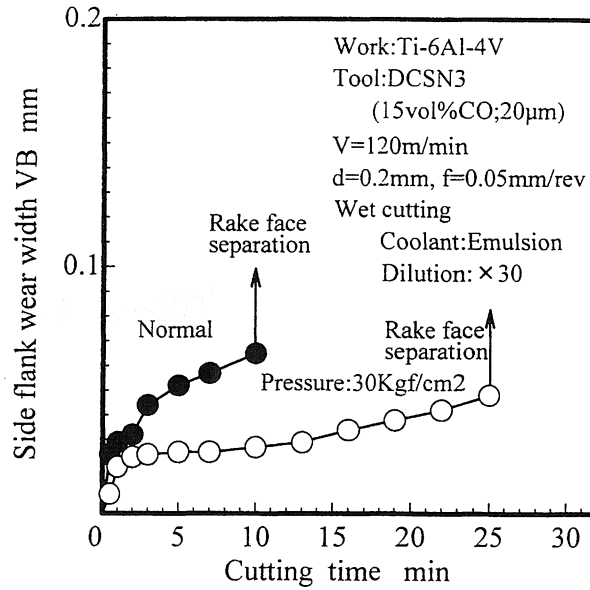


Fig. 10 Effect of high pressure coolant supply on tool wear

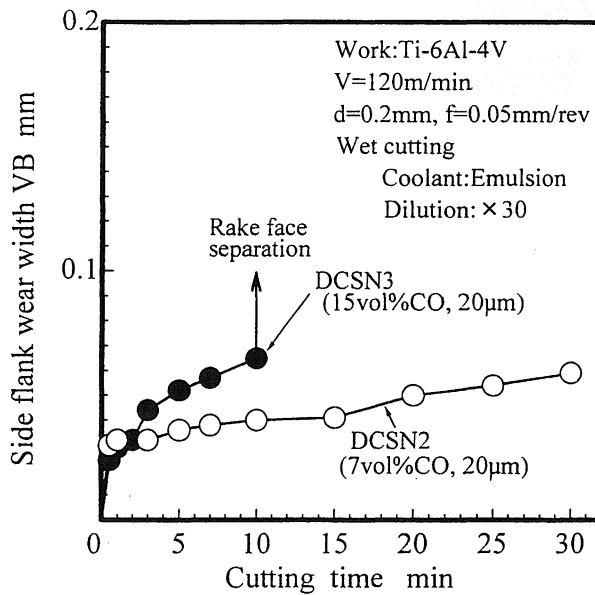


Fig. 11 Effect of diamond film quality on tool wear in machining of titanium alloy

が 7 vol%CO で合成したものである。前述のように、15 vol%CO で合成した DCSN-3 では、すくい面に剝離を生じるのに対して、7 vol%CO で合成した DCSN-2 では剝離を生じることなく切削することが可能である。これは、膜の密着性と熱伝導の相違が原因と考えられる。このことから、チタン合金を切削する場合には、できるだけ高純度膜の工具を用いるのが望ましいと考えられる。さらに工具のコーナー半径を大きくし、切り取り厚さが薄くなる形状の工具（丸駒形状）の方が工具寿命の延長に効果があるという結果も得られている。

5. ダイヤモンドコーテッド工具の摩耗機構と適用範囲

Fig. 12に、アルミ合金及び CFRP を図中の各切削条件下で切削したときのダイヤモンド

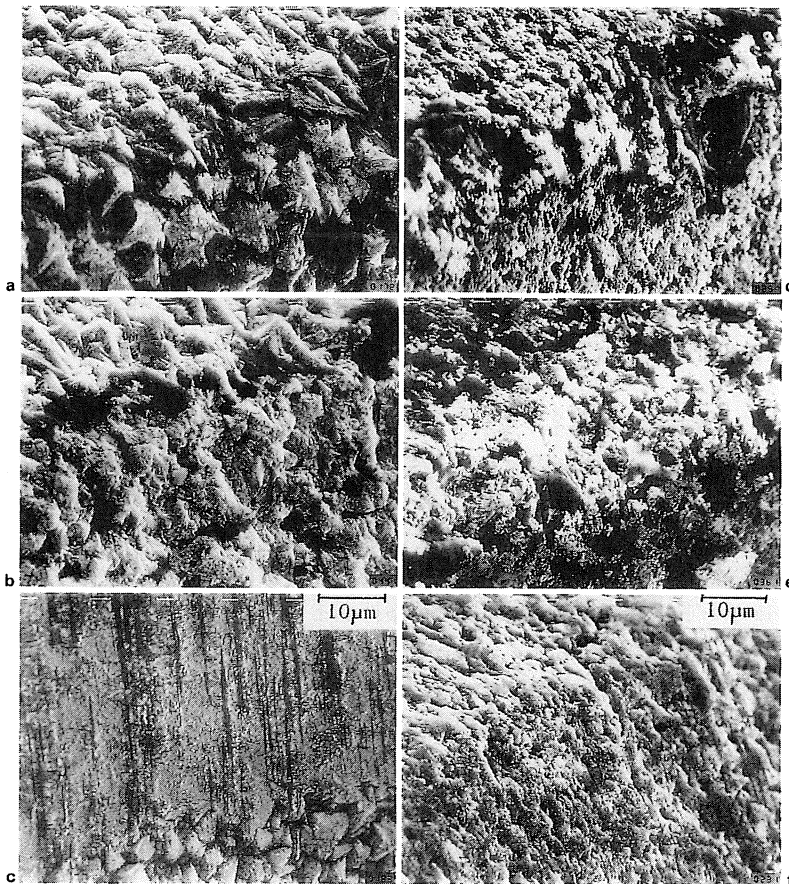


Fig. 12 Photomicrographs of worn surfaces of tools during the machining of al alloys and fibre reinforced polymers under wet cutting conditions
a-c: Tool DCSN3, d-f: Sintered diamond tool

コーテッド工具と焼結ダイヤモンド工具の切刃摩耗部の拡大写真を示す。なお、アルミ合金を切削した工具は、被削材の溶着を除去するために10%希塩酸に数分浸し、溶着物の除去を行った。

低Siのアルミ合金を切削した場合には、摩耗面のダイヤモンド粒子がアブレイブ摩耗を受けてダイヤモンド粒子の突起部が摩滅しているのが観察される (Fig. 12a)。一方、高Siのアルミ合金を切削した場合には、低Siアルミ合金の場合と異なり、ダイヤモンド粒子の摩滅は見られず、粒子が破碎、脱落したと思われる痕跡の凹凸が見られる (Fig. 12b)。これに対して、焼結ダイヤモンド工具の場合には、マイクロチップングや摩耗面にはダイヤモンド粒子の破碎、脱落によると推定される凹凸痕が観察される (Fig. 12d, e)。

さらに、CFRPを切削した場合には (Fig. 12c)、ダイヤモンドコーテッド工具の方は、ダイヤモンド粒子が摩滅して摩耗部は平らで滑らかな状態になっているのが観察される。また摩耗面には炭素繊維の擦過などによる条痕が見られる。一方、焼結ダイヤモンド工具ではダイヤモンドコーテッド工具と異なりはっきりとした擦過痕は見られず、粒子の脱落痕と思われる凹凸が摩耗面に見られる。

以上の結果から、ダイヤモンドコーテッド工具の摩耗には2種類の摩耗機構があると考えられる。一つは、CFRPを切削した時のようなダイヤモンド粒子の摩滅型 (タイプ1) と高Siアルミ合金を切削したときのダイヤモンド粒子破碎、脱落型 (タイプ2) である。またこの結果とこれまでの旋削実験の結果とを合わせて考えると、タイプ1の摩耗機構ではダイヤモンドコーテッド工具と焼結ダイヤモンド工具はほぼ同じ摩耗進行速度を示すが、タイプ2の場合にはダイヤモンドコーテッド工具の切削性能は焼結ダイヤモンド工具よりも劣ると言える。これは、ダイヤモンド粒子の結晶性と粒子間の結合力が低いことに起因していると考えられる。

Table 4に、各種被削材をダイヤモンドコーテッド窒化けい素工具で加工するときの推奨切削条件を示す。アルミ合金を切削する場合には、Si含有量が12 vol%未満の材料であれば、切削速度1500 m/min以上、高送りあるいは切り込みを大きくしても焼結ダイヤモンド工具と同等のほぼ満足できる加工が可能であるが、Si含有量がさらに高くなるとダイヤモンド膜の剝離のために低Si含有の材料と同じ条件下では切削することが困難である。しかし、切削速度を下げるかあるいは軽切削の条件のように適切な切削条件を選択してやれば、高Siアルミニウム合金でもダイヤモンド膜が剝離することなく切削することができる。一方、繊維強化プラスチックの場合には、GFRPは切削速度、送り、切込みを高くあるいは大きくしても剝離を生じることなく切削することが可能であるが、CFRPは含有繊維のアブレイブ性が強くなるためにGFRPよりも幾分適正切削条件が低くなっている。また切削温度が高くなるTi-6Al-4Vに対しては、条件的に緩い軽切削であれば切削可能であるが、使用条件、適切な切削条件は限定され、その選定には注意が必要である。

6. 結 論

ダイヤモンドコーテッド窒化けい素工具の切削性能、ダイヤモンドコーテッド工具の摩耗

Table 4 Recommended conditions for cutting various workpiece materials using diamond coated tools under wet cutting conditions*

Al-8 vol%Si	V > 1500 (at d=0.5, f=0.1) d > 3.0 (at V=1000, f=0.2) f > 0.3 (at V=1000, d=2.0)
Al-10 vol%Si	V > 1500 (at d=0.5, f=0.1) d < 2.0 (at V=1000, f=0.2) f < 0.3 (at V=1000, d=1.5)
Al-12 vol%Si	V < 1500 (at d=0.5, f=0.1) d < 2.0 (at V=800, f=0.2) f < 0.3 (at V=800, d=2.0)
Al-18 vol%Si	V < 200 (at d=0.5, f=0.1) or V ≤ 1000 (at d=0.2, f=0.01) d < 1.0 (at V=200, f=0.1) f < 0.1 (at V=200, d=1.0)
GFRP (60 vol% glass fibre)	V > 800 (at d=0.5, f=0.1) d > 1.0 (at V=600, f=0.1) f < 0.3 (at V=600, d=0.5)
CFRP (60 vol% carbon fibre)	V > 400 (at d=0.5, f=0.1) d > 2.0 (at V=400, f=0.1)
Ti-6Al-4V	V ≤ 90 (at d=0.2, f=0.05)

*d=depth of cut, mm: f=feed rate, mm rev⁻¹: V=cutting speed, m min⁻¹

機構, 各種被削材切削時の切削性能及びその適用範囲について検討した結果, 以下の結論が得られた.

1) ダイヤモンド膜の母材への密着強度は, 合成条件, 母材材質, 母材表面の粗さに依存し, これらの条件が不適切であればダイヤモンド膜は簡単に剝離する. しかし, 適切な条件を選択すれば, 剝離することなく実用的な切削性能が得られる.

2) ダイヤモンドコーテッド工具の摩耗は, コーティング膜中のダイヤモンド粒子の摩滅と粒子破碎・脱落型の摩耗の2種類を呈する. 一方, 焼結ダイヤモンド工具の場合は, マイクロチップングや粒子の破碎・脱落が支配的である. しかし, 摩耗機構が異なるにも関わらず, ダイヤモンドコーテッド工具の摩耗が粒子摩滅型の摩耗を呈するときには, 焼結ダイヤモンド工具とほぼ同等の切削性能を示す.

3) 窒化けい素セラミックスは, 超硬よりもダイヤモンドコーティング母材として優れている.

4) アルミニウム合金を切削した場合, ダイヤモンドコーテッド窒化けい素工具は, 12 vol%Si 未満の被削材に対して焼結ダイヤモンド工具と同等の切削性能を示す. しかし, 12 vol%Si 以上の被削材に対してはダイヤモンド膜が剝離するためにダイヤモンドコーテッド工具はあまり良い切削性能を示さない.

5) CFRP (52.1 vol%, 60 vol%炭素繊維含有) や GFRP (60 vol%ガラス繊維含有) を切

削る場合には、ダイヤモンドコーテッド工具は焼結ダイヤモンド工具と同等の優れた切削性能を示す。

6) チタン合金を切削する場合には、非常に軽い切削条件下でないと工具すくい面に剝離を生じ、安定して切削することが困難である。この剝離は、主にダイヤモンド膜に生じるクレータ摩耗の成長が原因であり、工具刃先を十分に冷却することで改善できる。またチタン合金切削時には高純度膜の方が適している。

参 考 文 献

- 1) F. OKUZUMI, J. MATSUDA and K. O'OKA: *Sci. Technol. New Diamond*, 1990, 149-153
- 2) S. SÖDERBERG, K. WESTERGREN, I. REINECK, P-E. EKHOLM and H. SHAHANI: *Appl. Diamond Films Related Mater.*, 1991, 43-51
- 3) R. A. HAY and C. D. DEAN: *Appl. Diamond Films Related Mater.*, 1991, 53-60
- 4) T. LEYENDECKER, O. LEMMER, A. JÜRGENS, S. ESSER and J. EBBERINK: *Appl. Diamond Films Related Mater.*, 1991, 105-110
- 5) M. YOSHIKAWA: *Diamond Films Technol.*, 1991, 1, (1), 1-29
- 6) K. ITO, T. ITO and I. HOSOYA: *Chem. Lett.*, 1988, (4), 589-592
- 7) T. ITO and N. HAYASHI: *New Diamond*: 1990, (2), 83-85
- 8) O. MATSUMOTO and R. FURUKAWA: *Sci. Technol. New Diamond*, 1990, 161-165
- 9) H. MATSUBARA and J. KIHARA: *Sci. Technol. New Diamond*, 1990, 89-93
- 10) H. YOSHIMURA, K. NAKAHARA, H. YAMASHITA and N. KIKUCHI: *Sci. Technol. New Diamond*, 1990, 111-118
- 11) K. SAIJO, M. YAGI, K. SHIBUKI and S. TAKATSU: *Proc. 1st Japan Int. SAMPE Symp.*, 1989, 1436-1441