

溶射材料の切削加工

臼杵 年*・鳴瀧 則彦**・山根八洲男**

Study on Machining of Sprayed Materials

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

Yasuo YAMANE

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

(Received September 18, 1998)

Abstract

This paper aims to clarify the machinability of sprayed materials. In this paper, two kinds of metallic sprayed materials and three kinds of ceramic sprayed materials were turned with several kinds of cutting tools, and fundamental machining data such as tool wear, cutting temperature and quality of surface finish were obtained. Further, diffusion test and wet cutting test etc. were conducted to clarify the tool wear mechanism and to improve the machinability of them. The main results obtained were as follows; 1) The cutting temperature of metallic sprayed materials were very higher than that of S45C. 2) CBN and cermet tool showed the excellent cutting performance in machining of ferrous sprayed material, and it was possible to machine practically and high efficiently. 3) Carbide tools (cutting grade for cast iron) were suitable for machining of 13Cr sprayed material, and carbide tool of lower Co content was better. 4) In dry cutting of 13Cr sprayed material, it was possible to machine only within the range of the cutting speed from $V=20$ m/min to $V=30$ m/min stably. 5) CBN tool was suitable for machining of TiO_2 and ZrO_2 ceramic sprayed materials. Also, it was difficult to cut Al_2O_3 ceramic sprayed material excluding the wet cutting condition with sintered diamond tool because of high hardness of work material.

1. 緒 言

溶射法は、熔融状態に加熱した溶射材料を、粒子状態にして高速度で母材表面に吹き付け、必要とする皮膜層を形成する表面被覆法の1つである。

この方法は、各種材料表面にほとんどの金属やセラミックスを溶射施工することが出来る上、メッキ処理などの表面被覆法に比べ、比較的簡単に厚肉の皮膜形成ができ、しかも各種合金元素の添加や溶射施工中に生成する酸化物等のために耐食性、耐摩耗性等に優れた皮膜層を形成できるという特徴を持っており、材料に応じて様々な方法が考案されている^{1,2)}etc.

このように、溶射法は種々の特徴を有しているが、これら溶射施工された製品は、そのままでは要求される寸法精度を満足しないのが通常である。したがって、その寸法精度を向上させるためには溶射層の機械加工が必要不可欠となる。

ところで、溶射層は前述したように耐摩耗性向上のために各種合金元素を含んでいたり、溶融粒子が飛行中に酸化するため、基地のマトリックス中に硬質粒子や酸化物が点在する組織となり、またガスの発生や気孔の閉じ込め等により多孔質状の組織形態になっている。したがって、溶射皮膜は難削性を示すものが多く、加工は主として研削加工に依存しているのが現状である³⁾。

本研究では、金属系およびセラミック系溶射材料の加工能率向上を目的として旋削加工を行い、工具摩耗、仕上げ面性状、切削温度、切削抵抗等の基礎的な切削特性を調査し、その被削性、最適工具、最適切削条件等を明らかにした。さらに、金属系溶射材旋削時の工具摩耗機構についても検討した。

2. 実験方法

被削材としては、13Cr 溶射材 (JIS ステンレス鋼溶射 1 種 1 級 MSUS1-1)、Fe 溶射材 (JIS 低合金鋼溶射 1 種 MLS1) の 2 種類の金属系溶射材料と比較として SUS420J2, S45C を、またセラミック系溶射材料として Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 の 3 種類を使用した。溶射施工は金属系溶射材料がアセチレンガス溶射で、S35C の母材表面に片肉 2.5 mm の肉盛りを、またセラミック系溶射材料がプラズマジェット溶射で片肉 0.5 mm の肉盛りを施した。実験はこの溶射層のみを旋削加工した。表 1 にこれら溶射材の化学成分 (溶射施工後) と機械的性質を示す。化学成分上の特徴として、金属系溶射材の酸素含有量が非常に高く、硬さが 13Cr 溶射材料で $Hv=400\sim 450$ 、Fe 溶射材料で $Hv=380\sim 420$ となっている。またセラミック系では、 Al_2O_3 が $Hv=760$ と最も高く、 TiO_2 , ZrO_2 は共に $Hv=400\sim 450$ となっている。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of work materials

Work mark	Chemical compositions (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	O
13Cr-Sprayed	0.36	0.33	0.44	0.018	0.017	0.28	12.25	0.026	—	9.2
Fe-Sprayed	0.05	0.08	1.92	0.009	0.012	4.08	1.03	1.280	0.36	8.5

Work mark	Tensile strength (Kgf/cm ²)	Adhesion strength (Kgf/cm ²)	Hardness (Hv)
13Cr-Sprayed	1600~1800	300~350	400~450
Fe-Sprayed	—	—	380~420

Work mark	Chemical compositions	Hardness (Hv)
Al_2O_3 -Sprayed	Al_2O_3 ; 94%, TiO_2 ; 2.5%, SiO_2 ; 2.0%	760
TiO_2 -Sprayed	TiO_2 ; 99%	400~450
ZrO_2 -Sprayed	ZrO_2 ; 92%, CaO; 8%	400~450

図1は、13Cr 溶射材、Fe 溶射材の組織写真である。同図で、黒色の部分は空孔、灰色の部分は酸化物である。図からわかるように両溶射材共に多孔質で酸化物を多量に含む特異な組織になっている。

実験は瀧澤鉄工所製 TAL560 型旋盤を用いて乾式及び湿式外丸削りを表2に示す切削条件で行った。使用工具は全て市販のスローアウェイ四角チップ (SNGN120408) である。また、工具ホルダーは、シャンク形状□25 mm のもの (ホルダー A) と□20 mm のもの (ホルダー B) を使い、突き出し量は 35 mm とした。

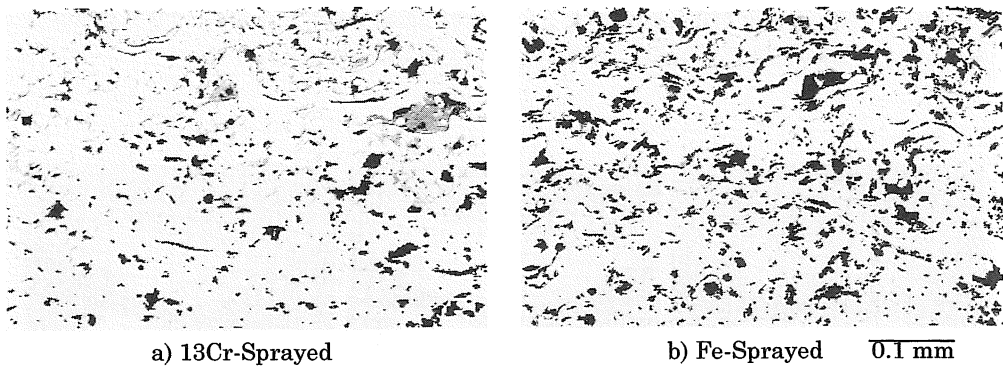


Fig. 1 Microstructure of work materials

Table 2 Cutting conditions

For metallic materials	
Tool material	Carbide K10, K01, CBN, Cermets, TiCN coated
Cutting speed	Varied from 5 to 300 m/min
Depth of cut	0.5 mm
Feed	0.097 mm/rev
Tool geometries	-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8
Cutting fluid	Dry, Wet(JIS 2-15, W1-2)
For ceramic material	
Tool material	Carbide K01, CBN, Sintered diamond
Cutting speed	Varied from 6 to 400 m/min
Depth of cut	0.2 mm
Feed	0.097 mm/rev
Tool geometries	-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8(square type) Rake angle -10°, -20°, -30°(button type)
Cutting fluid	Dry, Wet(JIS W1-2)

3. 金属系溶射材料の切削

3.1 Fe 溶射材の切削

図2に、Fe 溶射材を切削した時の超硬 K10 種，サーメット，CBN 工具の典型的な摩耗形態を示す。切削速度 20 m/min，切削時間10分（切削距離 200 m）時点で各工具の摩耗形態を比較すると（同図 a~c），いずれの工具もクレータ摩耗及び境界摩耗ともに見られず，ほぼ切刃に平行な摩耗を示しているが，どの工具にも切刃部に付着物の堆積が見られる。しかし，超硬工具に比べサーメット，CBN 工具の摩耗は，著しく小さいことがわかる。一方，サーメット，CBN 工具で切削速度を上げた場合には，同図 d~f に示すようにチャンファ内ではあるがクレータ摩耗が観察され，摩耗表面には溶着剥離を生じた痕跡も見られる。また，CBN 工具では切削速度 300 m/min になると，激しい溶着を生じたために，短時間の切削にもかかわらず切刃先端部が後退し，摩耗が著しく大きくなっている。

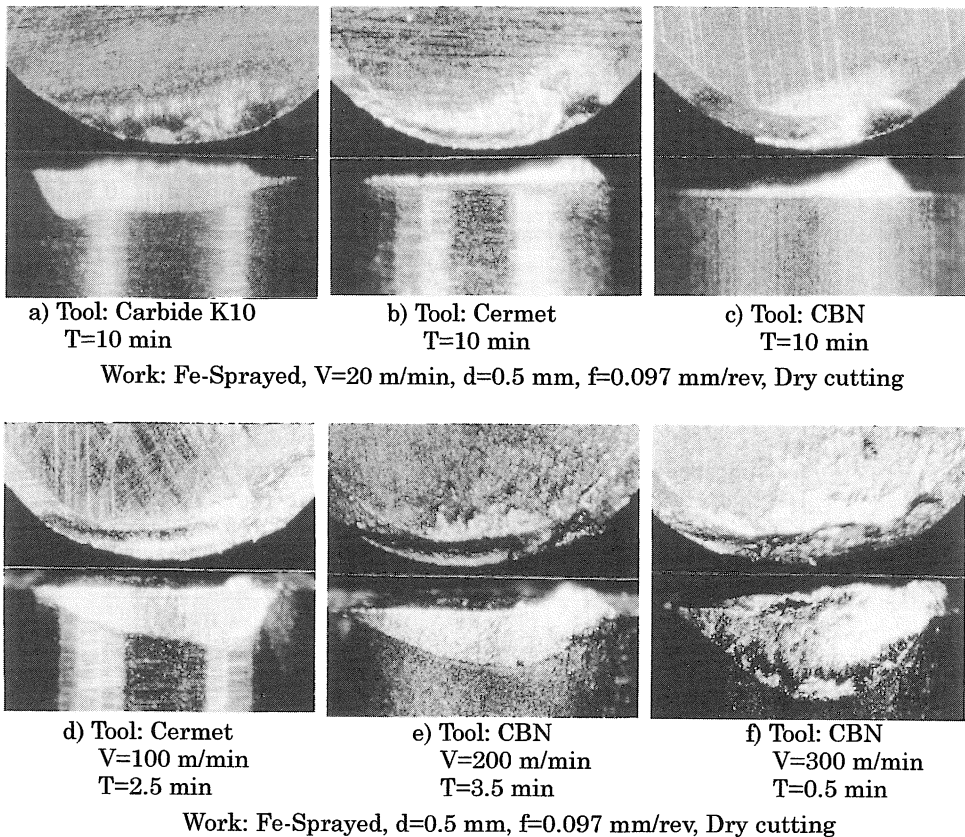


Fig. 2 Wear patterns of various cutting tools in machining of ferrous sprayed material

図3は、これら3種類の工具でFe溶射材を切削した時の各工具の工具寿命線図である。寿命基準は、逃げ面最大摩耗幅 $VB_{max}=0.1\text{ mm}$ とした。図より、各工具とも切削速度が低下するにつれてかなり工具寿命が延びており、熱的要因が工具寿命に強く影響していることがわかる。また各工具の工具寿命を比較すると CBN 工具が最も優れた性能を示し、次いでサーメット工具、超硬 K10 種の順となり、最も悪い超硬 K10 種に対してサーメット工具では約100倍以上、CBN 工具ではそのサーメット工具よりも約8倍程度寿命が長く、しかもより高速での切削が可能であることがわかる。

以上のことから、Fe溶射材を切削する場合、工具寿命、加工能率の観点から CBN 工具を用いるのが最も適切であると考えられる。また低速であれば、サーメット工具でも実用的な加工は行える。

3.2 13Cr 溶射材の切削

図4は、13Cr 溶射材切削時の切削速度 20 m/min における各種工具の摩耗形態を示したものである。超硬 K10 種の場合、切削時間10分（切削距離 200 m ）時点での摩耗形態は、前逃げ面境界部の摩耗が若干大きくはなっているが、逃げ面摩耗は切刃にほぼ平行な形になっている。また、クレータ摩耗は見られないが、切刃部にはわずかに付着物が見られる。また、超硬 K01 種の場合も同様の摩耗形態であるが、超硬 K10 種に比べ摩耗そのものが小さく、前逃げ面の摩耗もほとんど見られない状態になっている。

一方、CBN 及び TiCN コーテッド工具の場合には、逃げ面及びすくい面に多量の付着物がつき、さらに短時間の切削にもかかわらず CBN 工具では境界摩耗、特に横逃げ面境界摩

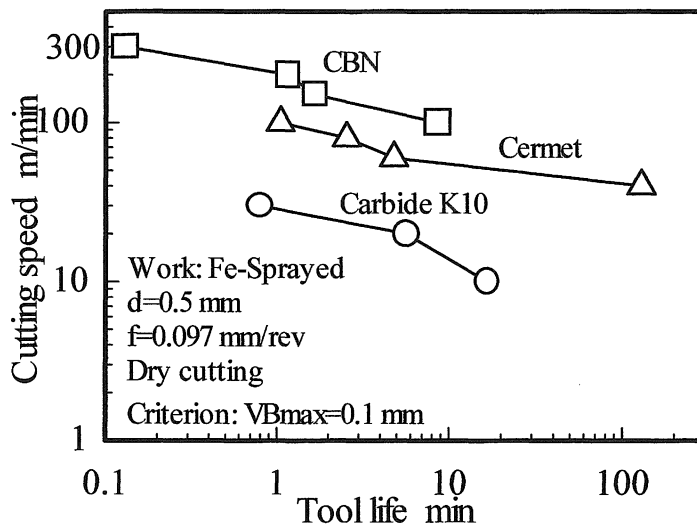
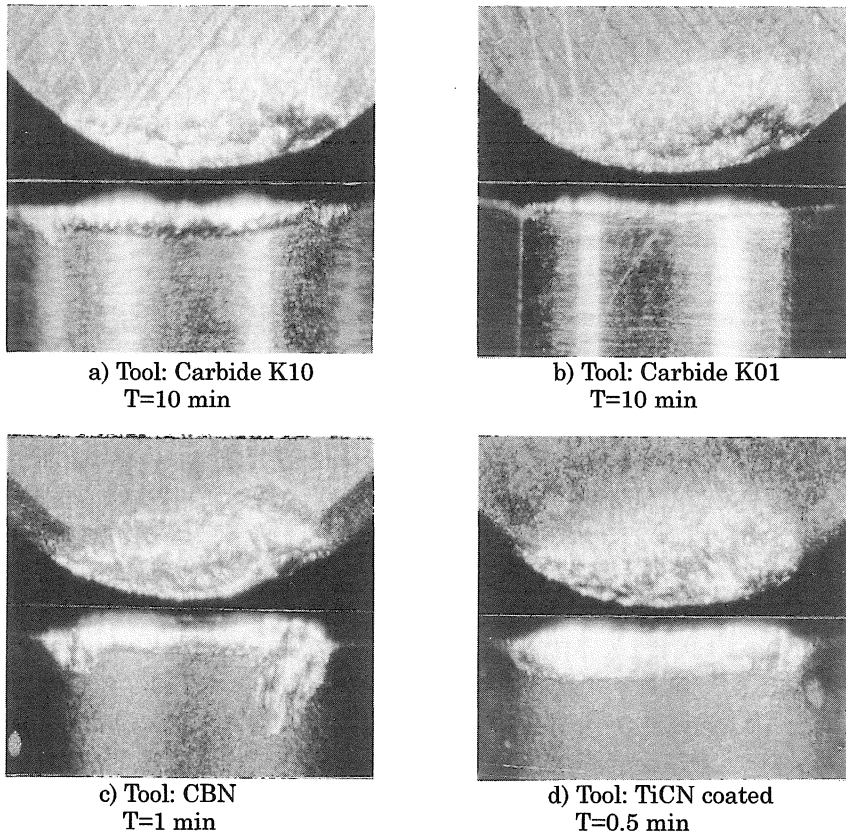


Fig. 3 Tool life curves of tested tools in machining of ferrous sprayed material



Work: 13Cr-Sprayed, $V=20$ m/min, $d=0.5$ mm, $f=0.097$ mm/rev, Dry cutting

Fig. 4 Wear patterns of various tested tools in machining of 13Cr sprayed material

耗の発達が著しい。なお、同工具について切削条件、工具形状、切削雰囲気等を変化させてみたが、工具摩耗及び摩耗形態にはあまり変化が見られなかった。また、その他サーメット、セラミック工具等でも切削を試みたが、短時間で大きく摩耗し、超硬工具以外では実用的な切削は困難であった。

そこで、超硬 K10 種を用いて切削速度に対する工具摩耗の挙動を調査した。図 5 は、切削速度 5~35 m/min の各切削速度における工具摩耗形態である。切削速度 5 m/min では、切削時間 5 分（切削距離 25 m）時点で前逃げ面境界部の摩耗が大きく発達しており、送りに相当するピッチで溝が観察される。この前逃げ面境界部の摩耗は切削速度の上昇に伴い小さくなっていき、切削速度 15 m/min 以上ではかなり小さくなり、切削速度 30 m/min で消失している。また、切削速度 30 m/min 付近までの摩耗はアブレーション主体の形態になっているが、さらに切削速度を上げ切削速度 35 m/min になると逃げ面に多量の付着物が見ら

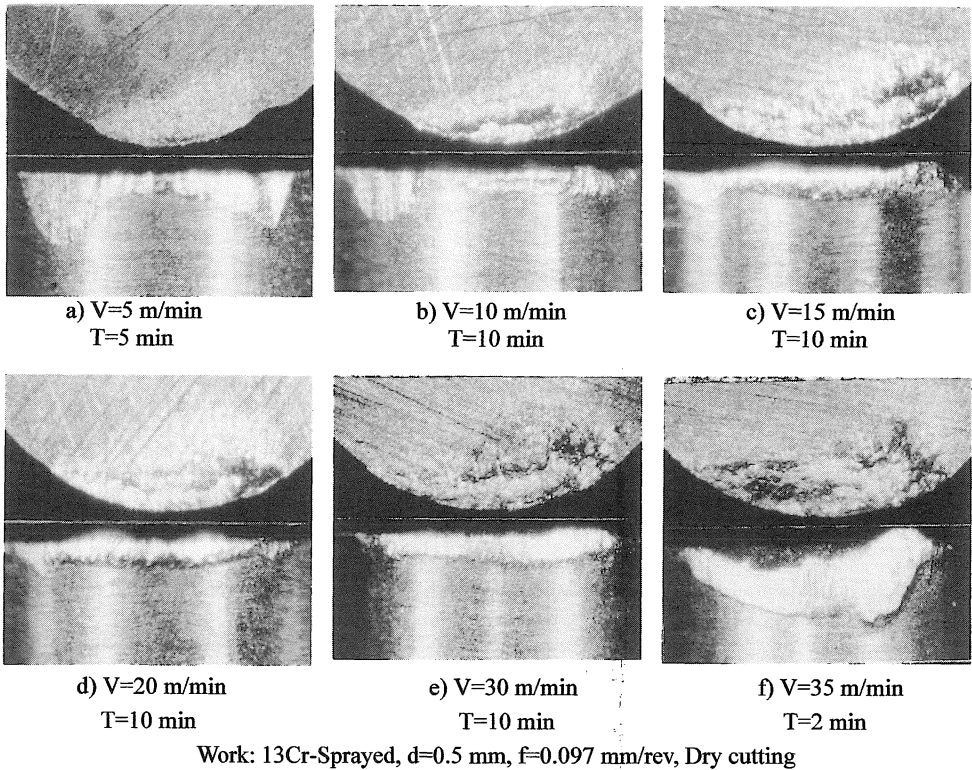


Fig. 5 Wear patterns of carbide K10 when changed the cutting speed in machining of 13Cr sprayed materials

れ、熱的要因の大きな摩耗形態に変化しているのがわかる。なお、超硬 K01 種の場合も切削速度の変化に対する工具摩耗挙動の傾向は同じであった。

図 6 は、この時の両超硬工具の工具寿命線図である。図からわかるように、どちらの工具においても工具寿命が切削速度 20 m/min 付近で最大値を示し、それより切削速度が高くて低くても工具寿命は短くなっている。このそれぞれの速度域での工具寿命低下原因は、図 5 で示したように切削速度 10 m/min 以下では前逃げ面境界部の摩耗が大きく発達するため、逆に切削速度 30 m/min 以上では熱的な要因が大きくなるために工具寿命の低下が起こっている。

3.3 切削温度

図 7 に各種被削材を超硬 K10 種で切削した時の切削温度を示す。被削材は、前記 2 種類の溶射材と比較としてステンレス鋼 SUS420J2 及び炭素鋼 S45C を用いた。また、切削温度の測定は工具-被削材間熱電対法により行った。図から、13Cr 溶射材切削時の切削温度は、

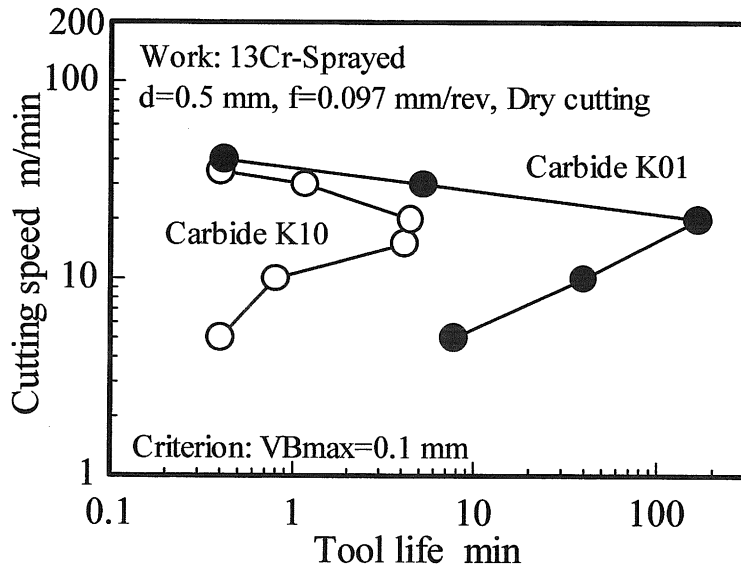


Fig. 6 Comparison of tool lives of carbide K10 and K01 in machining of 13Cr sprayed material

S45C 切削時よりも150~500°C程度，また SUS420J2 に比べても120~300°C程度高い値を示し，切削速度 30 m/min では600°C付近に達している．また，Fe 溶射材においても S45C に比べ約70~250°C程高い切削温度を示している．このように溶射材料切削時の切削温度が溶製材料に比べかなり高くなる原因の一つとしては，溶射皮膜組織中に薄い酸化膜の層や，空孔が多数存在するために皮膜の熱伝導率がかなり低くなっていることが考えられる．また，13Cr 溶射材はもともと熱伝導率の低いステンレス鋼 SUS420J2 を溶射施工したものであるため，図に示したように比較的低い切削速度でもかなり高い切削温度となっている．

3.4 仕上げ面性状

図 8 は，13Cr 溶射材を超硬 K10 種で切削した時の仕上げ面表面の写真である．切削速度 10 m/min では，写真（切削開始後30秒付近）の中央付近でそれまで見られていた仕上げ面上の送りマークがしだいに消え，付着物や素材粒子の脱落痕あるいは仕上げ面のむしれ等が多く見られる仕上げ面へと変わっているのが観察できる．このような変化は，先に示したように工具の前逃げ面摩耗が大きく発達するためである．

一方，切削速度 30 m/min では付着物や粒子の脱落痕は見られるものの同図(b)に示すような仕上げ面が切削開始から終了まで維持され，切削速度 10 m/min に比べると良好な仕上げ面となっている．

なお，Fe 溶射材の場合には上記の切削速度 30 m/min の時とほぼ同様の仕上げ面状態が得られる．

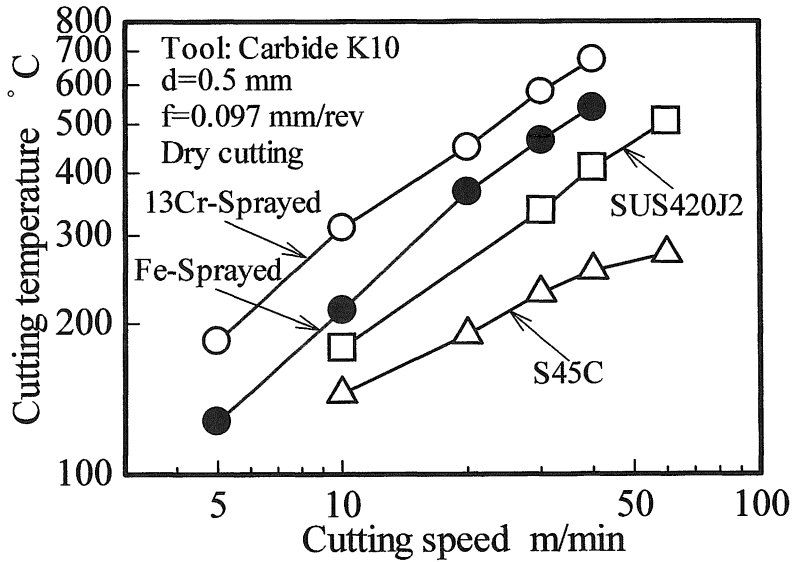


Fig. 7 Cutting temperature when machined Fe and 13Cr sprayed materials with carbide tool

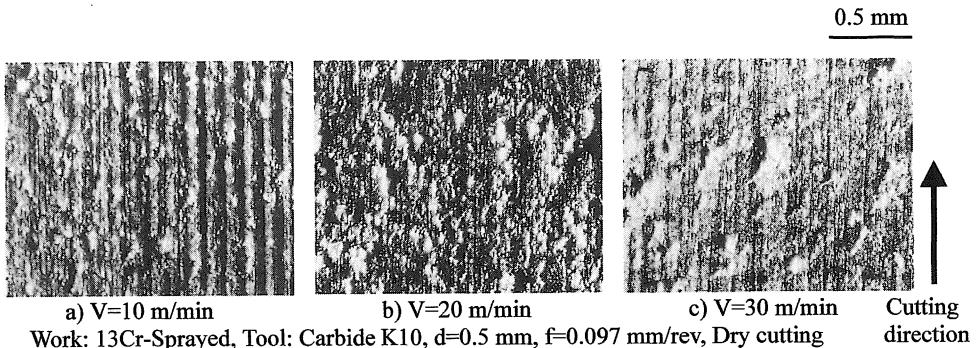


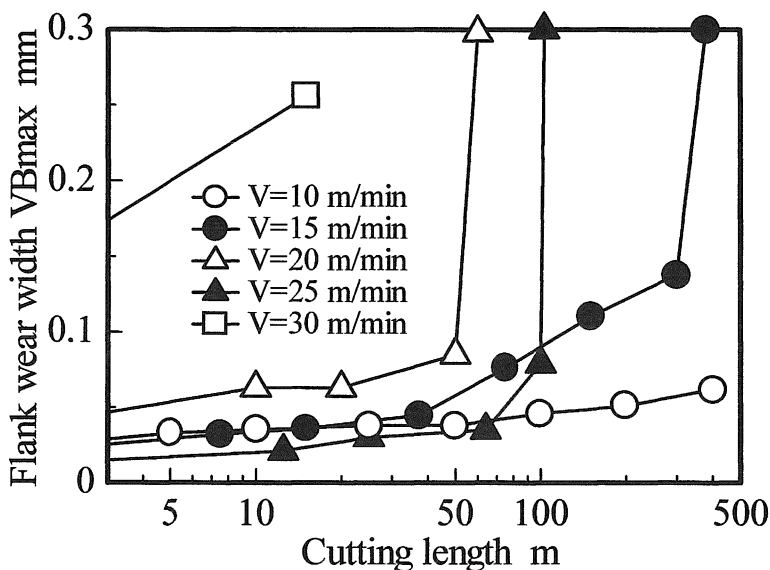
Fig. 8 Photographs of finished surface when machined 13Cr sprayed material with carbide tool

したがって、以上のことから溶射材料を加工する場合、仕上げ面状態から言えば、切削可能な切削速度範囲で、できるだけ切削速度を高く選ぶことが望ましいと考えられる。

4. セラミック系溶射材料の切削

4.1 TiO₂ 溶射材料の切削

図9は、超硬 K01 種を用いて切削したときの摩耗進行線図である。なお、横軸（切削距離）は対数表示している。図から、切削速度 15 m/min 以上では、ある程度切削した後に急



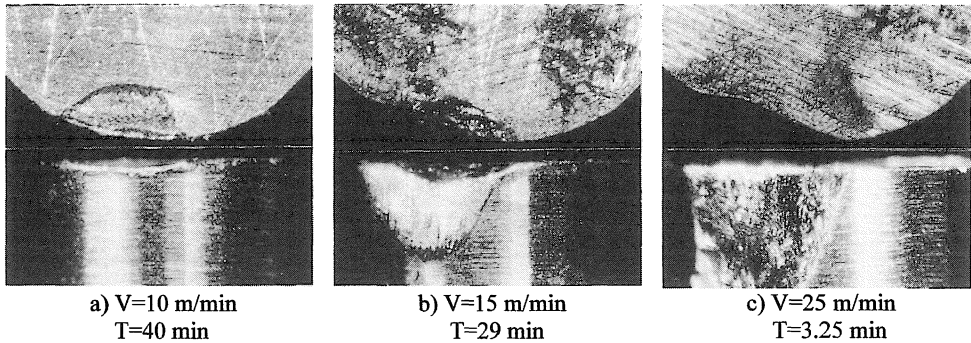
Work: TiO₂-Sprayed, Tool: Carbide K01, d=0.2 mm, f=0.097 mm/rev, Dry cutting

Fig. 9 Wear progress curves of carbide K01 in machining of TiO₂ sprayed material

激に摩耗が大きくなる現象が見られる。一方、切削速度 10 m/min では、切削距離 400 m の段階では、上記のような摩耗進行の急激な変化は生じていないが、切削を継続すれば同様な現象を引き起こす可能性は十分に考えられる。また、超硬 K01 種では、切削速度 30 m/min 以上での切削は困難である。図10は、この時の工具摩耗形態である。切削速度 15 m/min 以上で寿命に達した工具は、切刃が欠損し後退している。また、逃げ面摩耗部に付着物も見られる。一方、V=10 m/min ではすくい面上に剥離を生じており、それに伴って切刃位置が低下している。なお、全般に共通した摩耗形態上の変化の特徴は、切削初期にすくい面上に付着物がつき、ある程度切削した時点より急に剥離を生じ始める。そして剥離開始後しばらく経過した後に写真のような欠損に至る。

以上のように、この摩耗現象の原因の一つには、溶着の発生が関係することから、初期の切刃の鋭利さが摩耗の発達によって失われるために、切削温度が上昇することが関連していると考えられる。

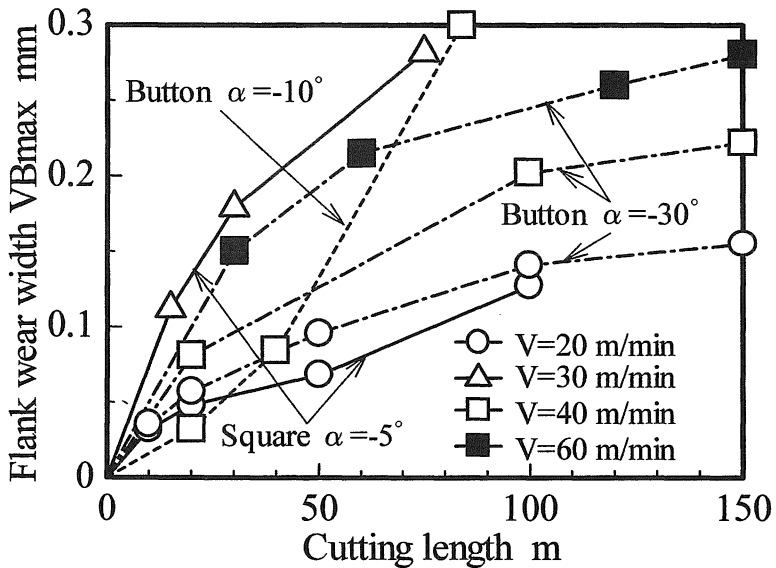
図11は、超硬 K01 種では摩耗進行が極めて不安定であるため、より硬度が高く、耐熱性にも優れる CBN 工具を用いて切削したときの摩耗進行線図である。なお、工具形状は SNGN120408 (四角) 型と RNG120400 (丸駒) 型を用いた。両工具形状ともに切削速度の上昇につれて摩耗進行が速くなるが、V=20 m/min より高い切削速度では、四角型より丸駒型の方が、またすくい角をネガに大きくとった方が同じ摩耗進行割合で比較すると、より高速で加工することができる。また超硬 K01 種と比較すると、CBN 工具は必ずしも摩耗進



a) V=10 m/min T=40 min b) V=15 m/min T=29 min c) V=25 m/min T=3.25 min

Work: TiO₂-Sprayed, Tool: Carbide K01, d=0.2 mm, f=0.097 mm/rev, Dry cutting

Fig. 10 Wear patterns of carbide K01 in machining of TiO₂ sprayed material



Work: TiO₂-Sprayed, Tool: CBN, d=0.2 mm, f=0.097 mm/rev, Dry cutting

Fig. 11 Wear progress curves of CBN tool in machining of TiO₂ sprayed material

行の点で優位であるとは言えないが、突発的な欠損が発生しないという安定性の面からは優れている。

4.2 ZrO₂ 溶射材料の切削

図12に、超硬 K01 種及び CBN 工具（いずれも SNGN120408 型）で ZrO₂ 溶射材料を切削したときの摩耗進行線図を示す。超硬工具では摩耗進行が切削速度に無関係で切削距離に

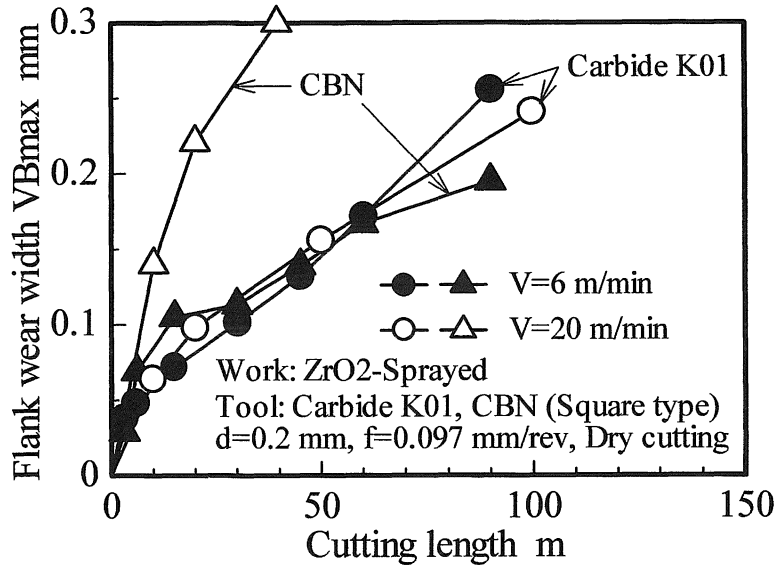


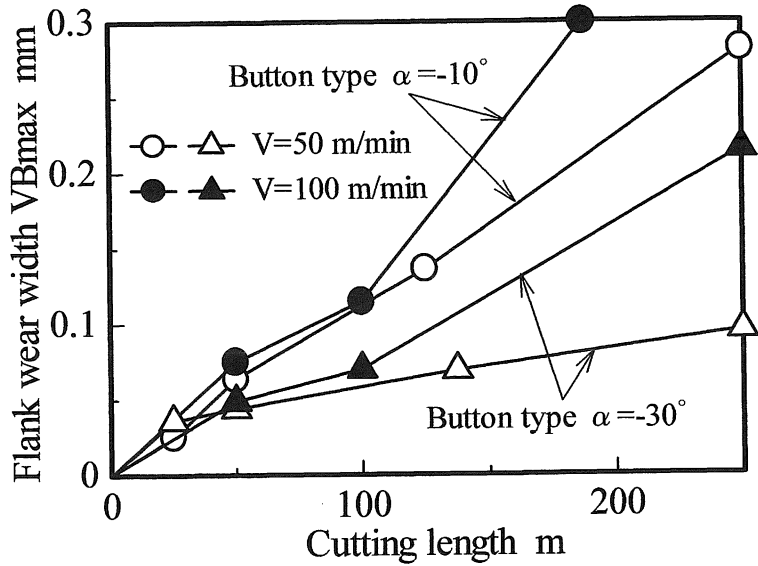
Fig. 12 Wear progress curves of tested tool in machining of ZrO_2 sprayed material

依存し、単純にアブレーション主体の摩耗であることがわかる。一方、CBN 工具は、 $V=6$ m/min では超硬工具と同程度の摩耗進行であるが、切削速度を 20 m/min にすると切削距離 40 m で $VB_{max}=0.3$ mm に達してしまう。摩耗形態の観察結果から、この時の摩耗はアブレーションに横切刃のチップングが加わり、横逃げ面摩耗が極端に大きくなるためであり、横切刃のチップングを防いでやれば工具性能の改善が期待できる。そこで、刃先強度の増加と横切刃への負荷の軽減を目的に、コーナー半径の大きな丸駒タイプの工具を用いて実験を行った。

図13は、この時の摩耗進行線図である。四角タイプの工具に比べて、丸駒工具では、かなり高速での切削が可能であり、 $V=50$ m/min では摩耗進行もかなり緩くなっている。またいずれの切削速度においても、すくい角 -10 に比べすくい角 -30 の摩耗進行割合は $1/2$ 以下と、すくい角をネガに大きくした方が摩耗進行は遅くなる傾向が見られる。

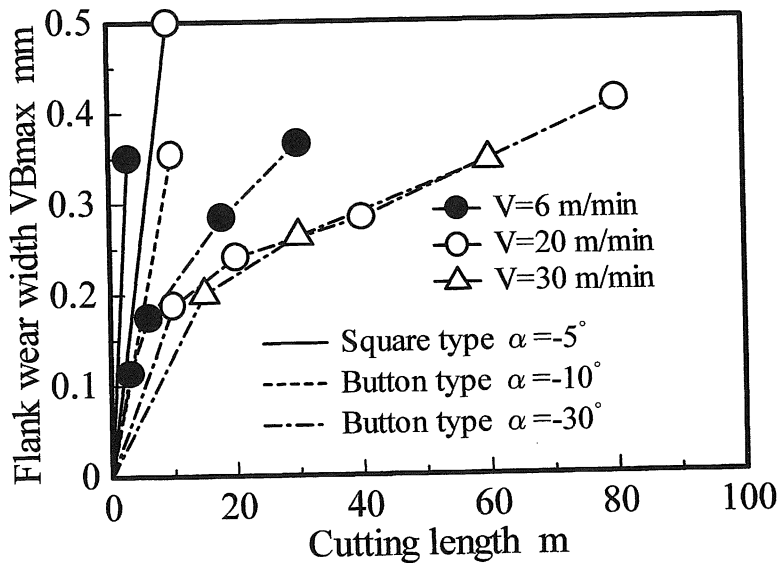
4.3 Al_2O_3 溶射材料の切削

図14に、CBN (SNGN120408 型, RNG120410 型) 工具を用いて Al_2O_3 溶射材料を切削したときの摩耗進行線図を示す。丸駒工具を用いて、すくい角 -30 で切削した場合、他に比べて摩耗進行割合は低くなっているが、いずれの場合も切削距離 50 m 以内に $VB_{max}=0.3$ mm を超えている。また切削速度を遅くすると、チップングが激しくなり摩耗進行がより促進される傾向にある。 Al_2O_3 溶射材料は、他の材料より硬度が高いために CBN 工具でもほとんど実用的な切削は困難である。そこで、焼結ダイヤモンド工具（丸駒



Work: ZrO_2 -Sprayed, Tool: CBN (Button type), $d=0.2$ mm, $f=0.097$ mm/rev, Dry cutting

Fig. 13 Wear progress curves of button type CBN tool in machining of ZrO_2 sprayed material



Work: Al_2O_3 -Sprayed, Tool: CBN, $d=0.2$ mm, $f=0.097$ mm/rev, Dry cutting

Fig. 14 Wear progress curves of CBN tools in machining of Al_2O_3 sprayed material

工具)での湿式切削を試みた。

この時の摩耗進行線図を図15に示す。切削速度 200 m/min でも初期摩耗後ほとんど摩耗が進行せず、切削距離 1500 m で $VB_{max}=0.066$ mm と非常に優れた切削性能を示している。しかし、切削速度が 300, 400 m/min と増加するに連れて摩耗進行も急速に速くなっている。したがって、硬度の高い Al_2O_3 溶射材料を切削する場合には、焼結ダイヤモンドの丸駒工具を用いて切削速度 200 m/min 程度で湿式切削するのが好ましいと言える。ただし、丸駒形状の工具では加工形状が限定されるので、工具形状については検討が必要である。

4.4 仕上げ面性状

図16に、各セラミック溶射材料を切削したときの代表的な仕上げ面写真を示す。いずれの材料の仕上げ面も工具逃げ面が擦過した部分と被削材表面が脱落し掘り起こされた部分が観察される。また擦過痕の見られる滑らかな表面には切削方向に直角なクラックが見られる。このクラックの深さを確認するために断面を観察してみたが、仕上げ研削を行う場合に支障となるほどの深いクラックは確認されなかった。さらに、いずれの材料でも工具材種、切削条件などによる仕上げ面の著しい差異は見られず、表面粗さは TiO_2 溶射材で $R_{max}=6\sim 8\ \mu m$, ZrO_2 溶射材で他より少し粗い $R_{max}=10\sim 14\ \mu m$, Al_2O_3 溶射材で $R_{max}=5\sim 7\ \mu m$ であった。

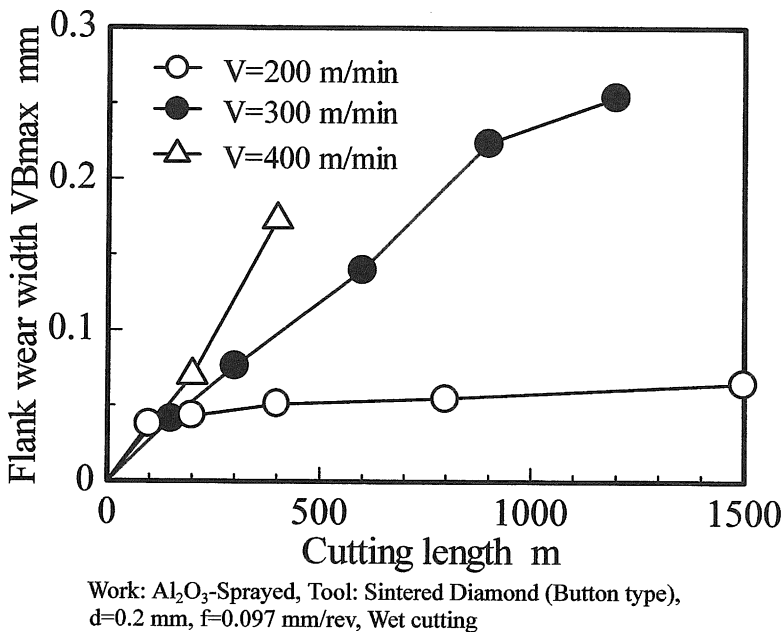


Fig. 15 Wear progress curves of sintered diamond tool in machining of Al_2O_3 sprayed material

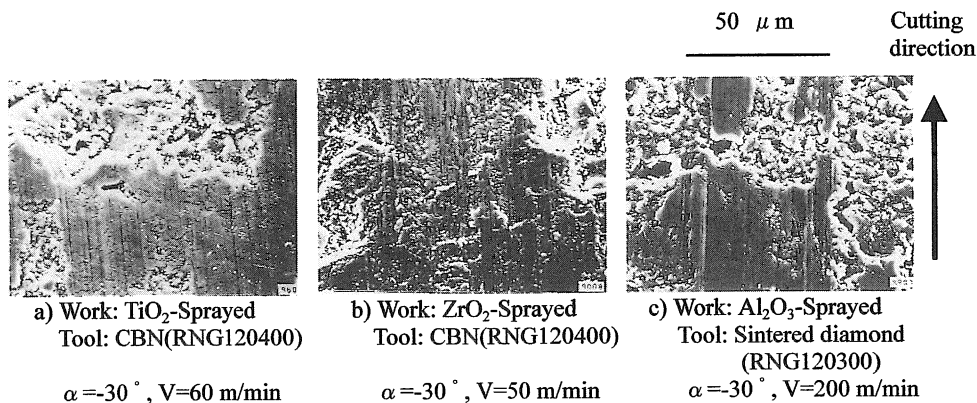


Fig. 16 Typical finished surface of various ceramic sprayed materials

5. 考 察

以上の結果から、セラミック系溶射材料については基本的にセラミックスの加工と同じであり、また Fe 溶射材については適正な工具、切削条件を選べば実用上問題のない加工が可能である。本章では金属系材料で特に難削性を強く示す 13Cr 溶射材について二、三の考察を行った。

5.1 溶製材料との比較

これまで述べてきた溶射材料の切削特性が同材料特有の現象かどうかについて 13Cr 溶射材とその溶製材である SUS420J2 の比較を行ってみた。図17に超硬 K10 種及び CBN 工具で 13Cr 溶射材及び SUS420J2 を切削した時の工具摩耗形態を示す。SUS420J2 では、13Cr 溶射材に比べ両工具とも工具への溶着が少なく、溶射材では切削不可能な 100 m/min 以上の切削速度でも摩耗はわずかである。しかも溶射材切削時ほどの激しい溶着も生じていない。したがって前章で示した切削時の特徴は溶射材料が持つ固有の特徴と考えられる。

5.2 溶着性について

溶射材切削時に激しい溶着を生じるが、その原因としては、溶射材が多量の酸化物（Fe 系，Cr 系等）を含有し、切削温度が非常に高温であることなどが考えられる。特に Fe 系酸化物は工具に溶着を起し易いと言われており、また CBN 工具は Fe 系酸化物と反応し易い⁴⁻⁶⁾。そこで、これらのことを確認するために溶射材と工具の間で静的反応実験を行った結果、超硬 K10 と 13Cr 溶射材の場合、約 50 μm の Co の拡散が認められ、両者が溶着を起し易い状況にあることが確認された。なお他の組合せでも程度の差こそあれ、同様の結果が得られた。

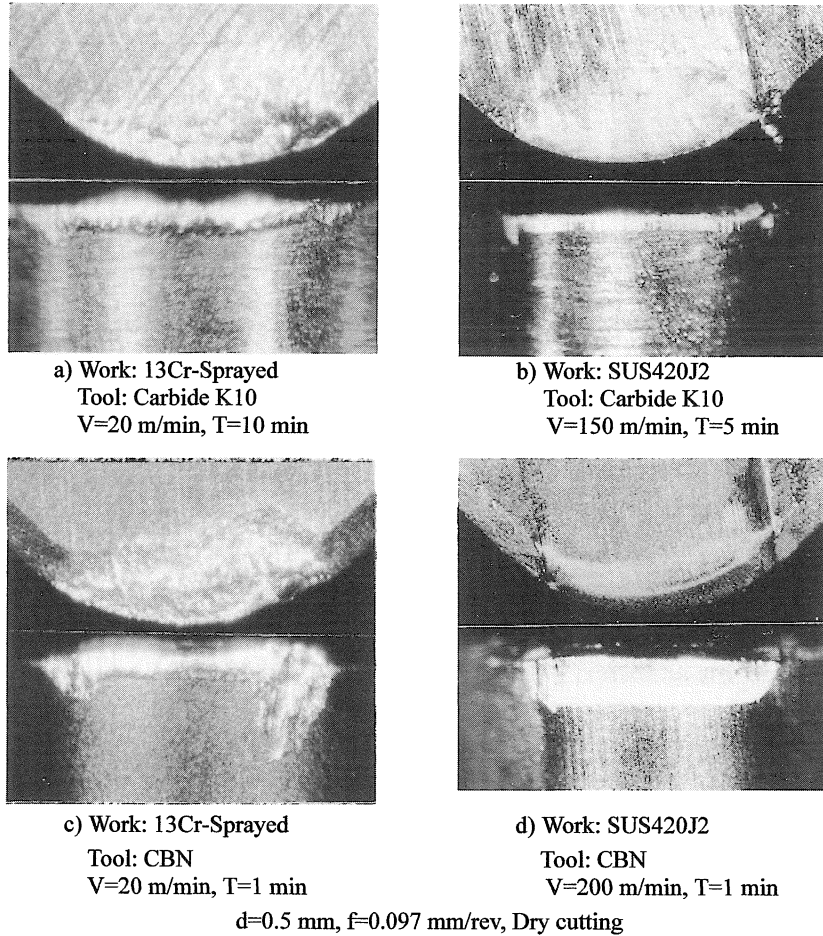
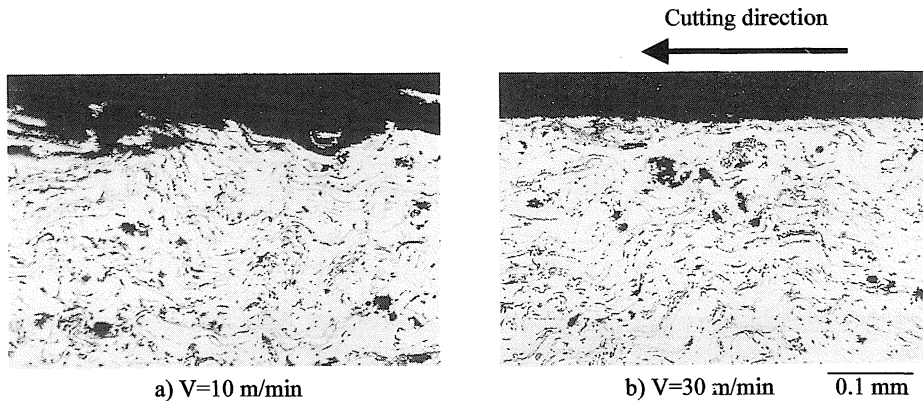


Fig. 17 Comparison of wear patterns of carbide and CBN tools when machined 13Cr sprayed material and stainless steel SUS420J2

5.3 境界摩耗について

超硬工具および CBN 工具で切削した際に大きな境界摩耗を生じる。しかし両工具での発生原因は、摩耗形態から推察して異なっていると考えられる。

まず超硬工具の場合、切削速度が 20 m/min より低い速度域で前逃げ面境界摩耗が大きくなる。この速度域では、切削温度も低く被削材硬さもある程度維持されていると考えられる。図18は、切削速度 10 m/min および 30 m/min での仕上げ面の切削方向の断面写真である。切削速度 10 m/min では、仕上げ面にむしれやうねりあるいは表層組織の流動が見られ、また溶射された被削材粒子の脱落も見られる。これに対し切削速度 30 m/min では、仕



Work: 13Cr-Sprayed, Tool: Carbide K10, $d=5$ mm, $f=0.097$ mm/rev, Dry cutting

Fig. 18 Microphotographs of cross section of finished surface when machined 13Cr sprayed material with carbide tool under the different cutting speed

上げ面は平坦でしかも表層付近の組織の流れもごくわずかであり、鋭利な切削が行われている。このことから前逃げ面境界摩耗の一因として、低速では硬い被削材表面を擦過すること、さらに低速時の被削材粒子の脱落によってこれら粒子が工具表面を擦過していくことも境界摩耗を助長していると考えられる。

また、図19に断面積の異なる（工具の支持剛性の異なる）工具ホルダー A, B を用いて切削したときの工具摩耗形態を示す。切削速度 30 m/min の場合にはどちらのホルダーを用いても摩耗にほとんど差異が見られないが、切削速度が低速になるにつれて支持剛性の低いホルダー B の方が前逃げ面境界摩耗が大きくなっている。特に切削速度 10 m/min では切削時間が短いにもかかわらず、ホルダー B を用いると境界摩耗がホルダー A よりも大きくなっている。なお溶射材切削時には、工具刃先に S45C を切削した時に比べ約 3 倍の加速度がかかっており、工具が振動を起し易い状況になっていた。したがって、これらの結果から、この境界摩耗の発生要因には工具刃先の振動も重要な関わりを持っていると考えられる。

一方、CBN 工具については、被削材の溶着が主要因と推定される。しかし切削速度、工具形状、刃先雰囲気など変化させて実験を行ったが、いずれの場合でも境界摩耗に顕著な変化が見られず、その発生原因を確定することはできなかった。

5.4 工具寿命改善について

溶射材をより高能率に加工するためには、耐熱性が高く、しかも酸化物を多量に含む被削材に対して親和性の低い工具材種を選ぶか、切削温度を下げて切削できるような切削様式を選択する必要がある。しかし現在のところ工具材種については3.2節で示したように超硬工具を除いては満足に切削できる工具が見あたらないため、ここでは切削温度の低下と工具形

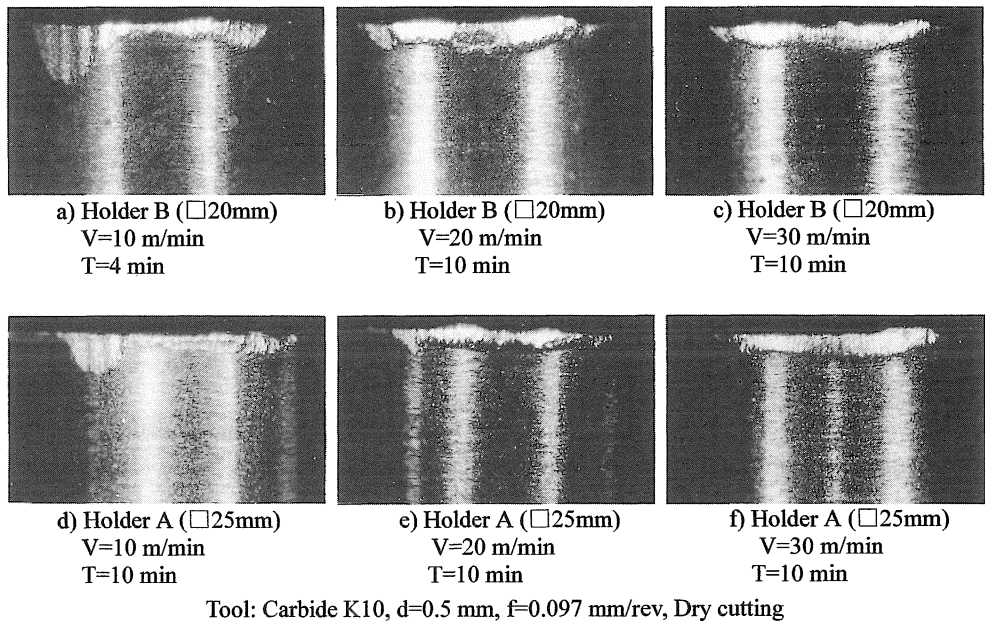


Fig. 19 Effect of tool holder stiffness on tool wear of carbide k10 in machining of 13Cr sprayed material

状の観点から検討した。

図20は、水溶性切削油剤を用いて湿式切削した時の切削距離 100 m 時点での工具摩耗量と切削速度の関係をプロットしたものである。工具は、超硬 K01 種である。なお、比較として乾式時のデータも併記した。図より、乾式切削では先に述べたように切削速度 $V=10$ m/min 未満の極低速では前逃げ面境界摩耗が大きく発達するために、また $V=30$ m/min を越えると熱的摩耗のために摩耗量が著しく大きくなり、摩耗の少ない切削速度の範囲がごく限られた領域に限定されている。これに対して、湿式切削した場合にはこの形がほぼそのまま高速側へと移行した形となり、高速側では $V=40$ m/min まで切削可能となっている。ところでこの結果を切削温度で整理してみると、湿式、乾式切削にかかわらず約 600°C を境として摩耗量が著しく大きくなる。一方低速側は、同一温度では湿式切削の方が摩耗が大きくなる。これは、切削油剤によって被削材自身も冷却されたために被削材の硬さが回復し、工具へのアブレシブ作用が増加するためと考えられる。

図21は、工具すくい角および逃げ角を変化させて切削した時の工具摩耗進行線図である。図からわかるようにすくい角を大きく、また逃げ角を大きくした方がより高速での切削が可能となっており、その効果はすくい角の方が大きくなっている。しかし、すくい角、逃げ角ともに大きくし過ぎると（すくい角 $+20^{\circ}$ 、逃げ角 10° 以上では）刃先が鋭利になりすぎるために短時間で欠損を生じ、安定な切削が不可能であった。

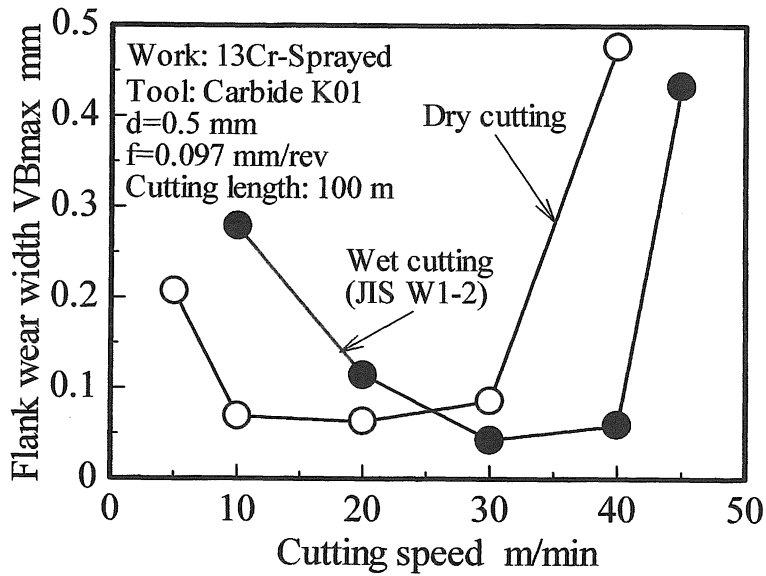


Fig. 20 Relationship of cutting speed and maximum flank wear width in machining of 13Cr sprayed material with carbide K01

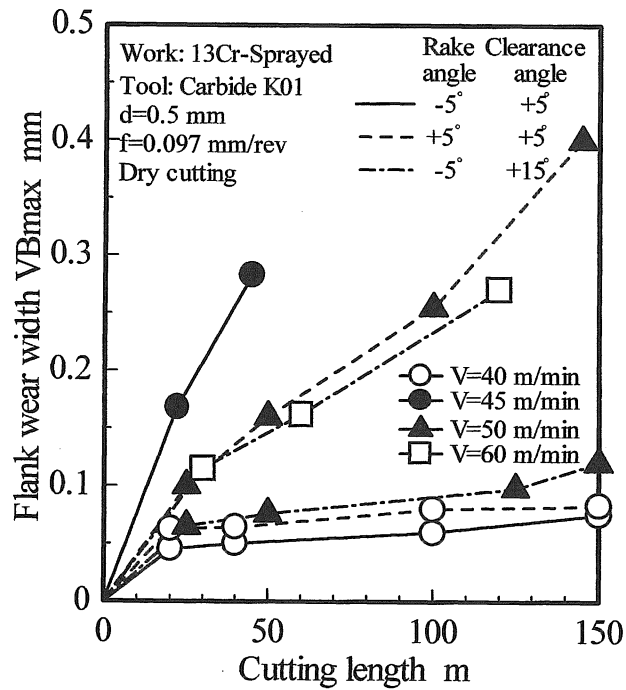


Fig. 21 Effect of tool geometries on tool wear in machining of 13Cr sprayed material

以上のことから、切削温度の低減と工具形状の対策を行えば、安定に切削可能な上限の切削速度をより高くすることができることがわかった。

6. 結 論

金属系溶射材料およびセラミック系溶射材料の被削性について検討した結果、次のような結論が得られた。

1) 金属系溶射材料切削時の切削温度は、S45C に比べ非常に高くなる。特に 13Cr 溶射材では150~500°C程度高く、SUS420J2 に比べても120~300°C程度高い値を示す。

2) 金属系溶射材料切削時の切削抵抗は、背分力が最も高い値を示し、高硬度材料切削時の特徴を示す。

3) Fe 溶射材の切削には、CBN、サーメット工具が適しており、高能率な実用切削が可能である。

4) 13Cr 溶射材の切削には、超硬 K 種が適しており、Co 量の少ないものの方が良い。

5) 13Cr 溶射材は、乾式切削時には $V=20\sim30$ m/min の範囲でのみ安定に切削できるが、それ以外の極低速では前逃げ面境界摩耗が大きくなるために、また $V=30$ m/min を越える速度域では熱的摩耗が激しくなるために工具寿命が著しく短くなる。

6) 13Cr 溶射材の加工能率を向上させるには、湿式切削や工具すくい角及び逃げ角を大きくすると効果がある。

7) TiO_2 溶射材、 ZrO_2 溶射材は、CBN 工具で切削加工であり、 TiO_2 溶射材は SNGN120408 (四角) 型工具で、また ZrO_2 溶射材は RNG120400 (丸駒) 型工具ですくい角をネガに大きくして加工するのが好ましい。

8) Al_2O_3 溶射材は被削材硬度が高いため、焼結ダイヤモンド工具以外の工具では実用的な切削は困難である。また工具切刃のチップングを避けるために丸駒形状の工具を用いて $V=200$ m/min 程度で湿式切削することが望ましい。

参 考 文 献

- 1) 工藤唯輔：金属，Vol. No. 12, (1985), 22
- 2) 長坂秀雄：金属，Vol. No. 12, (1985), 2
- 3) 蓮井 淳，森 垣修：溶接全書，187
- 4) Norihiko NARUTAKI and Yasuo YAMANE: Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 10 No. 3, (1976), 95
- 5) 鳴瀧則彦，山根八洲男：精密機械，Vol. 45 No. 2, (1979)
- 6) Norihiko NARUTAKI and Hiroshi USUKI: Metal Powder Report, Vol. 41 No. 11, (1986), 839