

# Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>系セラミック工具の切削性能について

北川 亮三\*・大草 喜太雄\*

## Wear Mechanism of The Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramic Tools in Cutting Cast Iron

Ryozo KITAGAWA and Kitao OKUSA

### Abstract

The silicon nitride ceramic Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> is superior to the conventional oxide ceramic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in several characteristics. It has greater shock resistance, the low rate of expansion at high temperature, and somewhat superior thermal conductivity.

The Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic tools used for this experiment were made by sintering method. Tool wear mechanism of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic tools in cutting has been studied with regard to ceramic grades and cutting edge failures. Ceramic tool's properties were varied by changing the chemical compositions and the sintering methods.

Machining tests were conducted on a turning machine and a milling machine by cutting FC25 cast iron. Cutting speed was varied from 100 m/min to about 1000 m/min and feed rate was used at 0.2 or 0.3 mm/tooth whereas depth of cut was used constantly on these tests.

After test runs, the following conclusions were obtained:

- (1) There is a great deal of influence in tool toughness, when the tools are intertwined with the rod type of the silicon nitride particles.
- (2) It is found that the cutting ability of the tool relate with hardness and fracture toughness.

This type of tools minimizes the fall off of the silicon nitride particles on the cutting edge and reduces wears on the flank face.

## 1. 緒 言

窒化珪素 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> は低密度、高硬度であり、物理的には高熱伝導、低熱膨張、化学的には耐酸化性、耐蝕性など好ましい性質を有している。また、窒化珪素（以下 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> と略す）は耐熱衝撃性、耐溶着性を持ったため、ニューセラミックスとして機械部品や切削工具への応用を目的とした各種の研究開発が進められている。

この Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 粉末は難焼結性であり、焼結助剤を用いないと焼結して製品にすることが困難である。この焼結助剤は焼結後、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の粒界に低融点の非晶質ガラス相を作ることがある。このため、高強度焼結体の製造技術では焼結過程における粒界相の結晶化が開発の一つのポイントである<sup>1)2)</sup>。しかしながら、切削工具として使用できる高強度焼結体の製造に対する簡易な方法は見つかっていない。

この研究では高純度の Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 粉末を用いて焼結体を

試作し、切削工具としての性能評価を行ない、工具損傷の観察から焼結体の物理的性質と耐衝撃性、耐摩耗性との関係を調べた。そして、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 系セラミックの切削工具への適応性について検討した結果について述べる。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験に用いたセラミック工具

この研究に用いたセラミック工具は試作品と市販品を含む Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 系 6 種類とその比較に用いた Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系 2 種類の合計 8 種類である。それぞれの工具について実測した比重、硬度、破壊じん性値<sup>3)</sup> を Table 1 に表す。また X 線分析より求めた化学成分の値も Table 1 に併記した。

Table 1 に示した UA, UB, UC はホットプレス法を用いて焼結した試作品である。このセラミック板は焼結温度 1750℃、プレス機の圧力 400 kg/cm<sup>2</sup>、焼結時間 90 分、窒素ガス雰囲気中で焼結して製作した。その仕上り寸法は直径 56 mm、厚さ 5.5 mm である。この

\*生産機械工学科

Table 1 Mechanical properties and chemical composition of tested tools.

Tool	Sp.G (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness		Fracture toughness K <sub>IC</sub> (MN/m <sup>3/2</sup> )	Chemical composition						
		H <sub>A</sub>	Hv(200g)		Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TaC	MgO	TiC	
FX	3.258	92.74	1657	8.9	○	○					
NA	3.247	92.84	1683	6.4	○	○	○				
KY	3.265	93.08	1752	5.9	○	○	○				
UA	3.382	93.52	1816	6.3	○	○	○	○			
UB	3.240	92.16	1471	6.2	○	○	○				
UC	3.264	92.18	1527	5.8	○					○	
AT	4.234	94.26	2241	4.5			○				○
AL	3.980	93.92	2049	3.4			○				

円板より切削実験に用いるチップ（以下工具という）に加工した。工具の形状はJIS SNGN 432型の総研削形である。Table 1 に示した、FX, NA, KY は市販のSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>系セラミック工具であり、AT はAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCの黒セラミックで、AL はAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の白セラミックである。市販品の工具も試作品のそれも同一形状であり、いずれの工具にも-30°、幅0.1mmのチャンファをダイヤモンド研削盤にて設けた。このようにして工具形状にばらつきのないよう配慮した。

これら実験に用いた工具中のSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>やAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の粒子がどのように結合しているかを調べるため、各工具

の破断面を走査型電子顕微鏡（以下SEMと略す）により観察し、写真に撮影した。Fig.1 はTable 1 に示した工具のSEM写真で、その倍率は4000倍である。市販のSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>工具FX, NA, KY はいずれも棒状粒子がお互いに絡まり合い、その破面にはこの棒状粒子が破断した面も多く観察される。このことから靱性向上にはこの棒状粒子のお互いの絡み合いが必要とする説<sup>2)</sup>と良く符合している。3次元的な粒子の成長は焼結過程における焼結方法、加圧力、温度管理、雰囲気管理などに大きく影響されていると推察される。

市販のFX, NA, KY ともにホットプレス法で焼結されたと推定されるので、本実験用として試作したUA, UB, UC いずれもホットプレス法を用いて製作した。しかし、後者の破断面を観察すると前者のような棒状粒子の絡み合いは観察されなかった。また、Fig.1 よりAT, ALのAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系セラミック工具についても同様な破断面を観察することが出来る。このような組織の相違は工具の靱性と耐摩耗性に大きな影響を与えるものと考えられる。

## 2.2 切削実験

ここではセラミックス工具の切削性能を評価する方法として工具の耐摩耗性と耐欠損性(靱性)<sup>4)</sup>を調べることとした。耐摩耗性を評価する切削方式として連続切削である旋削を用いた。また、耐欠損性(耐衝撃性)を評価するそれとして断続切削である正面フライス削りを用いた。使用した工作機械は9kw 直流無段変速モータつき旋盤と主軸11kw モータ、送り3.7kw 直流モータつき万能横フライス盤である。被削材は鋳鉄FC-25をこの実験のため特別に用意した。その理由としてSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>中のSiは鋼と反応しやすく、耐摩耗性に低いと言われていること<sup>5)</sup>に基づいている。この被削材のブリネル硬度は139であり、引張り強さは20.5kg/mm<sup>2</sup>である。試験用の被削材は旋削用丸棒(直径200mm、長さ500mm)、正面フライス削り用角材(100mm×100mm×250mm)ともに同じロットの溶湯を用いて砂型鑄造ののち、削り出して所定の形状とした。鑄造に当って被削材の機械的性質にばらつきのないよう配慮した。この被削材の化学成分はTable 2 に示す。

Table 2 Chemical composition of work-material FC-25.

Cast iron	Chemical Composition (wt %)									
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	
FC25	3.20	1.82	0.60	0.044	0.022	0.06	0.02	0.08	0.01	

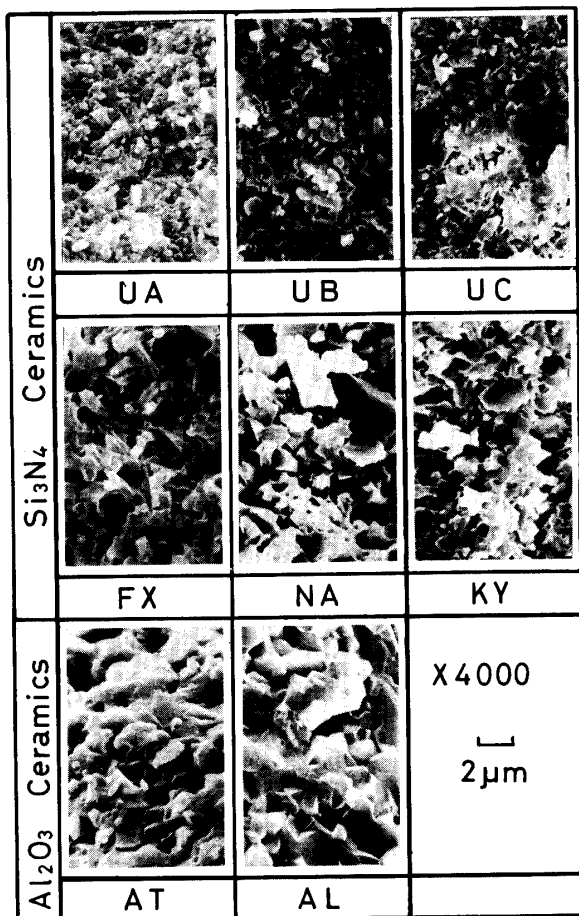


Fig. 1 SEM photographs of tested tools

### 3. 実験結果と考察

切削工具として具備しなければならない性質は次のように分類される。

- (1) 耐欠損性 (Breakage resistance)
- (2) 耐塑性変形性 (Deformation resistance)
- (3) 耐摩耗性 (Wear resistance)

これらの条件を満足する為には硬度、破壊靱性値、抗折力などの物理的性質が高い値を示すものほど良い切削工具と言える。この性質に影響を与える工具側の因子は次のように考えられる。

- (a) 窒化物や酸化物粒子径の大小と形状
- (b) 焼結助剤の成分と含有量
- (c) 工具の化学成分
- (d) 焼結方法 (常圧, ホットプレス, 熱間静水圧プレス)
- (e) 焼結中の雰囲気 (窒素ガス, 炭酸ガスなど)

(a)~(e)の製造上の諸因子は(1)~(3)の切削工具に対して要求される性質に大きく影響する。(1)~(3)に示した性質を評価することはセラミック工具の切削性能向上に寄与する。そこで、(3)を評価する方法として旋削、(1)(2)を評価する方法として正面フライス削りを選んだ。

このうち、新しい素材を工具材として利用する際に最も重要な性能は(1)の耐欠損性であり、その適切な評価は重視しなければならない大切な項目である。

始めに工具に加わる力の高低を知るため、旋削および正面フライス削りの切削抵抗3分力を実測した。測定に用いた切削工具動力計はスイス Kistler 社製の9257A 水晶力変換器と5007チャージ増幅器である。切削抵抗のアナログ波形はデータレコーダに記録ののち、本学情報処理センターでA/D変換後、電算機で処理して必要な解析結果を得た。

旋削を用いて各工具別に切削速度と切削抵抗3分力との関係を求め、その結果をSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>含有量と切削抵抗3分力の合力との関係で示したものがFig.2である。この図から切削速度の上昇に伴って切削抵抗は低下して、高速度鋼工具や超合金工具の場合と同様な傾向を示し、従来から言われていたことと矛盾していない。Fig.1に示したUA, UB, UCなどは低い合力値を示している。これは単にSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>含有量だけでなく、焼結助剤の影響と推察される。UAはTaCを含有していることも切削合力低下に寄与しているものと思われる。このようにSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>系セラミック工具中の化学成分や組織は鋳鉄の旋削においても切削抵抗の高低に影響を与えることが認められた。

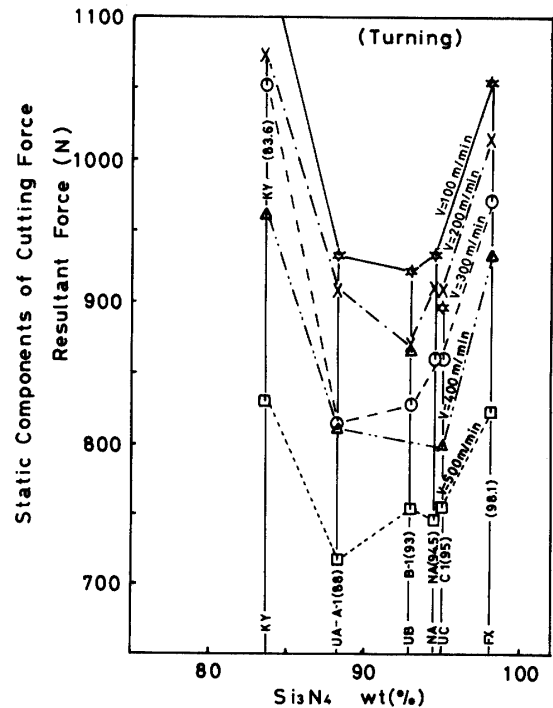


Fig. 2 Relation between Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> contents and resultant cutting force in turning with tested tools

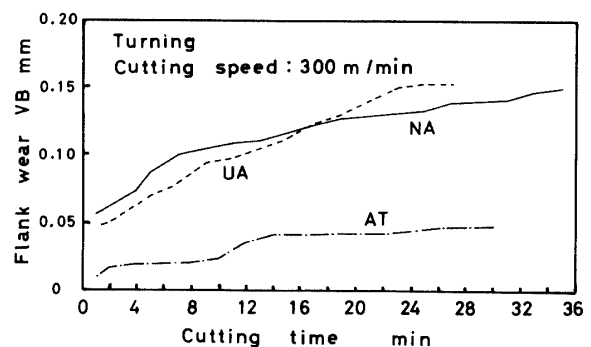


Fig. 3 Wear curves of tested tools in turning the FC-25 cast iron

つぎにSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>系セラミック工具UA, NAとAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系セラミック工具ATについて工具摩耗試験を行なった。Fig.3は切削時間と工具逃げ面摩耗幅VBとの関係を示す一例である。破壊靱性値がほぼ同じで、硬度の異なるUA, NAではVB摩耗の大きな差異は認められない。一方、ATを見るとVB摩耗は極めて小さい。これはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系セラミック工具の硬度はSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>系セラミック工具のそれと比べ、高い値を示すことから、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系セラミック工具が耐摩耗性に優れた結果を示した理由であろう。UB, UCはいずれも切削時間5~6分でVB=0.15mmを越え、低い耐摩耗性を示した。このように各工具の耐摩耗性はそれらの持つ硬度に大きく影響されることが分った。

工具の耐欠損性を調べるため、Fig.1 に示した工具を用いて正面フライス削りの切削抵抗を測定した。測定装置や解析法は Fig.2 に示した実験と同じものである。フライスカッタの直径は 254 mm で、その外周に一枚だけ工具を取りつけた。被削材幅は 100 mm で、それぞれの中心が合うようにして切削した。

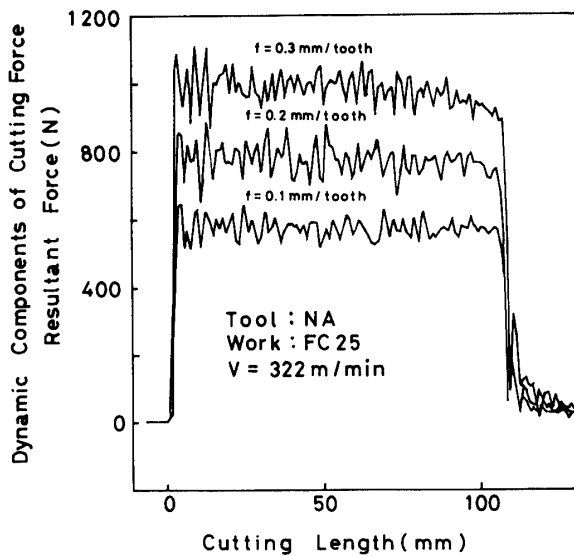


Fig. 4 Relation between feed rate and resultant cutting force in face milling

Fig.4 は被削材幅 100 mm を 1 回切削する時に生じた切削抵抗 3 分力の波形から求めた切削合力の波形である。この図は送りを 0.1, 0.2, 0.3 mm/tooth と変えて切削合力を求めた結果である。この図から測定装置の切削抵抗の応答性は正面フライス削りの切削現象にほぼ対応しているものと考えられ、以下、切削速度と切削抵抗との関係を Fig.1 に示した 8 種類の工具について求めた。切削速度は 322 m/min (5.4 m/s), 450 m/min (7.5 m/s), 606 m/min (10.1 m/s), 756 m/min (12.5 m/s), 990 m/min (16.0 m/s) の 5 速度であるが、ここでは 322, 990 m/min の測定結果について述べる。なお、切削抵抗の合力は Fig.5 の場合と同じ方法で算出した。Fig.6 は切削速度 322 m/min における正面フライス削りの切削合力である。いずれの工具も切削開始の工具すくい面と被削材との接触状態が同じであることから、切削開始時の合力はいずれも 1100N 程度を示している。この図から安定した切削領域を見ると  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  セラミック AT と UA が最も低い切削合力を示し、UB, UC の順に高い値を示している。一方、市販品の FX, KY, NA は殆ど同じ値を示し、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  セラミックの AL は高い合力値を示している。同様な切削抵抗測定の実験を 5 速度すべてについて行

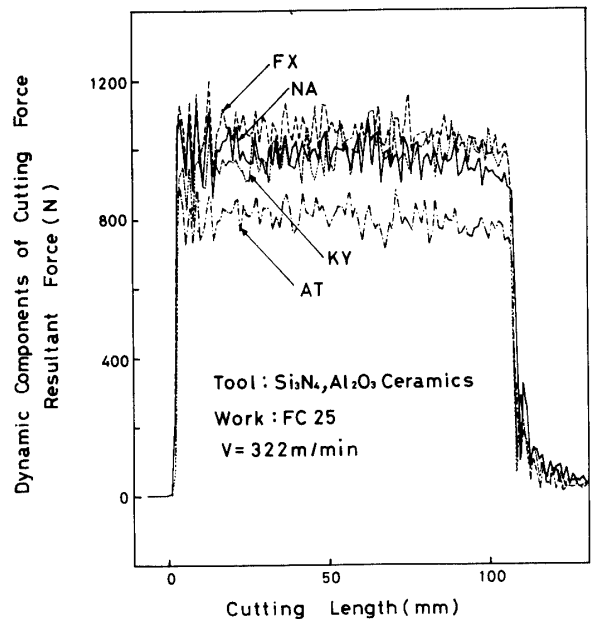
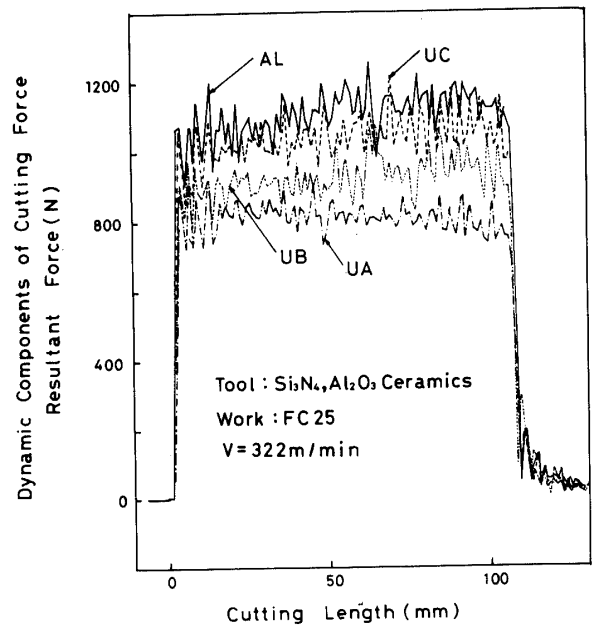


Fig. 5 Resultant cutting forces of tested tools used for milling FC-25 cast iron at the cutting speed of 332 m/min

ない検討したが、ここでは切削速度 990 m/min の実験結果について述べる。Fig.6 はその結果である。切削開始時の切削合力は 1300N 程度と Fig.5 の例よりも 200N 高くなっている。これは切削速度の増加に伴って衝撃力が大きくなったことを示す。しかし、安定した切削領域の切削合力を見ると切削合力は低下している。切削速度の上昇とともに切削抵抗は低減してゆくことと矛盾していない。切削速度 5 種類の実験を通じて、この実験に用いた 8 種類の工具の切削合力は切削速度の増加によってもその順位に変化を認められな

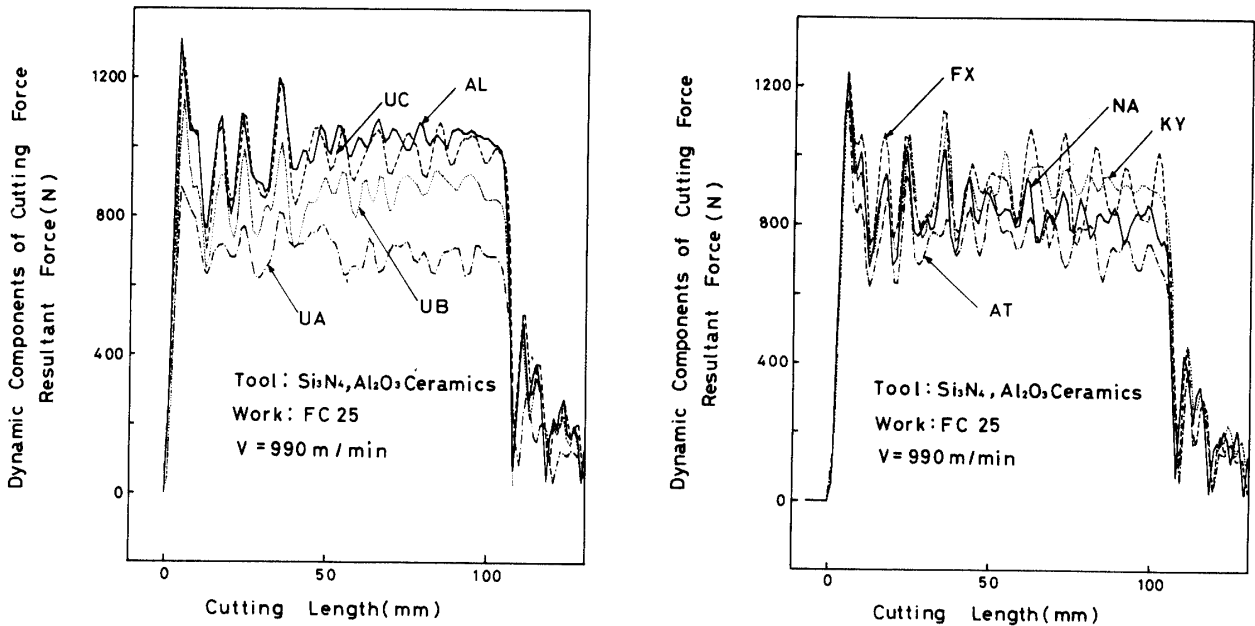


Fig. 6 Resultant cutting forces of tested tools used for milling FC-25 cast iron at the cutting speed of 990 m/min

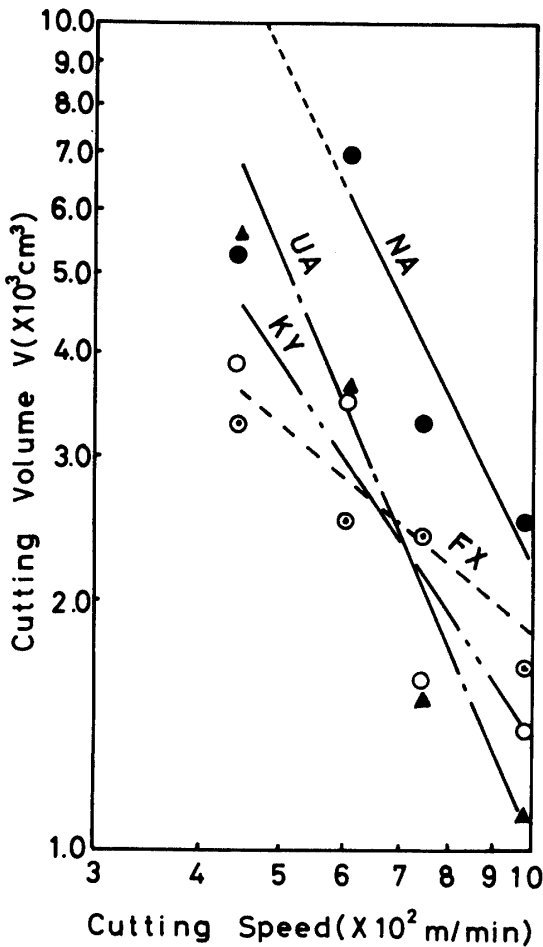


Fig. 7 Relationship between tool life and cutting speed in face milling with tested tools (Tool life criterion VB = 150 μm)

い、従って旋削の場合と同様に工具の化学成分、組織などが切削抵抗の高低に影響を与えることが認められた。正面フライス削りの切削抵抗は過渡的な現象を含んでいるが、工具すくい面と切りくず裏面に生ずる切削界面の現象は旋削とほぼ同じであると考えられる、このように正面フライス削りでは切削開始に高い衝撃力を受けるが、切削回数の少ないうちはいずれの工具にも欠損を見付けなかった。

これまでに工具に加わる切削合力の挙動が分ったので、8種類の工具について寿命試験を行なった。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>系セラミック工具は鋳鉄や耐熱合金の切削に良いと言われ、特に鋳鉄の高速切削が可能とも言われている。そこで、正面フライス削りの寿命試験を行なうこととし、切削速度は450, 606, 756, 990 m/minの4速を選び、切込み2 mm, 送り0.3 mm/tooth, 乾式の切削条件を選定した。Fig. 7は工具寿命試験の結果であり、Fig. 8は実験終了時の各工具の損傷写真である。Fig. 8に工具寿命試験は寿命基準をVB = 0.2 mmとし、最終的にはNA, UA, KY, FXの4工具のみであり、他のUB, UC, AT, ALはFig. 8の損傷写真に示すようにいずれも実験途中で欠損を生じてデータを得られなかった。Fig. 1の破面写真から考えて、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>の粒径はNA, FX, KY, UAの順に細くなり、粒径の細かい工具ほど寿命は切削速度の影響を受けやすいことがFig. 7の寿命線図より認められる。Fig. 7で見られるように高速側ほどFXの寿命は長くなる傾向を示している。これは工具中の焼結助剤Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が1.9 wt%と

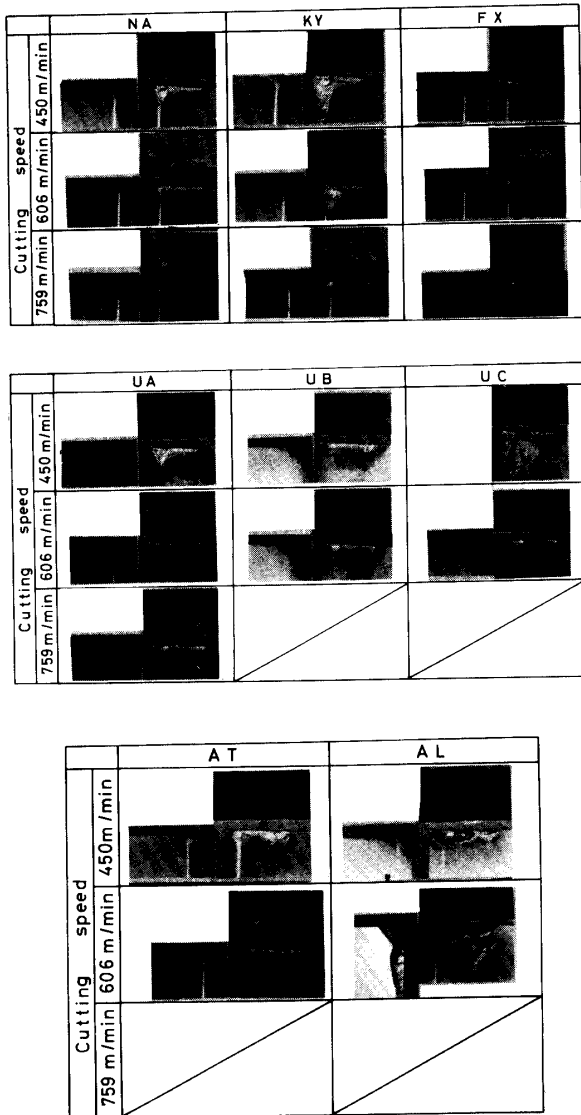


Fig. 8 Wear patterns of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic tool in face milling operation

少なく、しかも粒界の助剤部分を結晶化したものであることが影響していると推察される。いずれの工具の摩耗形態も矩形型のVB摩耗を示している。これは切れ刃稜が微細な欠け落ちを生じて摩耗するが、安定した摩耗状態を示している証拠である。この理由として実験に用いた被削材の鋳鉄FC25が良い被削性を示すことも一つと考えられる。

Fig. 7の工具寿命試験に供した4種類の工具について工具摩耗の原因を知るため工具すくい面に付着している元素をX線マイクロアナライザーで面分析を行った。分析元素はSi, Fe, Mn, Ca, Alの5元素である。その結果、4種類の工具ともすくい面へのFeの付着は認められず、Mn・Ca・Alの付着に僅かな相違が見られた。このことから、鋳鉄と $\text{Si}_3\text{N}_4$ 系セラミック工具との組み合わせはFe-Siの反応が起こりにくく、切削工

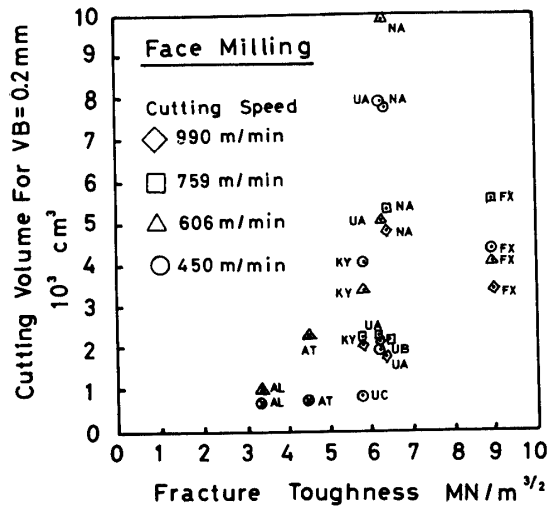


Fig. 9 Relationship between tool life and fracture toughness in face milling with tested tools

具として使用可能な一つの理由と考えられる。このため、元素分析は更に詳しく検討する予定である。Fig. 9破壊靱性値と寿命までの切削量で、寿命に工具の靱性は大きく影響していることが認められた。

#### 4. 結 言

これらの実験から次のことが分った。

- (1)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 系セラミック工具では棒状粒子がお互に絡み合った組織を持つものほど破壊靱性値は高い値を示す。
- (2) 硬度、破壊じん性値の高い値を示す工具材ほど、工具は耐欠損性と耐摩耗性に優れている。そして、正面フライス削り、旋削ともに工具寿命も長くなる。
- (3)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 粒子の細かい工具は高い切削速度で使用すると摩耗しやすい。しかし、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ セラミック中にTaCを分散させると切削性能を向上させることが分った。

本研究は昭和57年度、58年度宇部興産(株)の研究奨学金を受けて行なわれた。また、セラミックの各種加工は日本タングステン(株)のご好意によった。記して感謝の意を表わします。

#### 参 考 文 献

- 1) S.J. BURDEN: Ceram. Eng. Sci. Proc., **3**, 351~359 (1982)
- 2) 福原, 深沢: タングロイ, **23**, 52~57 (1983)
- 3) 新原: 窯業基礎討論会講演要旨集, 窯業協会, (1982)

- 4) R.L. HATSCHEK: American Machinist (Jan., 1983) p.110  
~113
- 5) 鈴木 寿: セラミックス, **19**, 549-556 (1984)

(昭和60年4月2日受理)