

セラミック工具による焼入鋼の切削加工***

越智秋雄*・鳴瀧則彦**

(昭和63年9月30日受理)

Machining of Hardened Steels with Ceramic Cutting Tools

Akio OCHI and Norihiko NARUTAKI

(Received Sept. 30, 1988)

Turning and milling tests of hardened plain and alloy steels (JIS S55C and JIS SNCM630) with TiC added ceramic tools are conducted and compared with carbide tools. Tool wear or disintegration of cutting edges are observed precisely under various cutting conditions and obtained tool life data are analyzed in order to evaluate the cutting performance of ceramic tools in machining of hardened steels. From these experiments, excellent performance of ceramic tools in turning test is reported. Also some specific facts and suggestions are proposed for the successful use of ceramic tools in face milling of steels.

Key Words: ceramic tools, hardened steels, turning, face milling, tool wear, tool life, tool breakage

1. 緒言

セラミック工具は、硬さや耐摩耗性に優れているだけでなく靱性もかなり向上しており、すでに鋼材の断続切削にも利用できる可能性があることを報告¹⁾した。一方、機械加工の必要な部品類は、近年ますます高強度化する傾向にあり焼入されたものも増加している。こうした材料を能率よく切削加工することができれば、研削加工の省略や研削代の減少あるいは型具の修正の簡易化等が可能となり、経済的効果が期待できる。このような分野には CBN 工具が優れた性能を示すことが報告^{2),3)}されているが、現在なお工具が高価であること、総型加工工具の製作が困難、中硬度以下の被削材ではかえって摩耗が増加するといった点から考えると上記のような利点を持ったセラミック工具が有効に使用できる可能性は十分残されていると考えら

れる。そこで、本研究ではロックウェル硬さがおおむね50以下（Cスケール）の中程度の硬さの焼入鋼を被削材に選び、セラミック工具による旋削および正面フライス切削実験を行い、工具損傷、寿命について超硬工具と比較しながら、セラミック工具の焼入鋼切削への適応性について検討した。

2. 実験装置および方法

旋削実験は瀧澤鐵工所製の高速旋盤（主軸動力 DC 11 kW, 7~3000 rpm 無段変速）による乾式外丸削りで行った。被削材は機械構造用合金鋼 SNCM630（引張強さ 120 kgf/mm²）の丸棒を用いた。その大きさは直径 50 mm, 長さ 330 mm で、硬さのばらつきをおさえるため 950°C から空冷焼入、その後 150°C で焼戻を行った。この結果、実験に用いた部分の硬さは H_RC30~35 の範囲内におさまっている。この被削

* 広島工業大学機械工学科

** 広島大学工学部

*** 一部を昭和56年度精機学会広島地方学術講演会（昭和56年11月15日）にて発表

材の化学成分を表1に示す。

工具は Tic 添加の Al_2O_3 系のセラミック工具（記号 C）および超硬工具 P10 種を用いた。切削速度は 50~315 m/min の間で適宜選び、切込みは 0.5 mm、送りは 0.14 mm/rev の一定とした。

フライス切削実験は大阪機工製のベッド型立フライス盤（2番、主軸動力 3.7 kW）による乾式正面フライス切削で行った。被削材は機械構造用炭素鋼 S55C の角材で大きさは高さ 45 mm、幅 45 mm、長さ 250 mm である。この材料を 850°C から水焼入し、焼戻温度を 350~650°C の間で3段階に変化させ、また生材も含めて、 H_{RC} 20~45 の4種類の被削材を製作、使用した。工具はセラミック工具については旋削と同じものを、超硬工具については P20 種を用いた。いずれも旋削用スローアウェイチップ（SNP432 型）を直径 160 mm の正面フライスカッターに1枚取り付け、中心削りを行った。これによりエンゲージ角およびディセンゲージ角はともに 31.4° となる。切削速度は 150~340 m/min の3種、切込みは 0.5 mm、

送りは 0.32~0.38 mm/tooth となるように選択した。実験に使用した工具の特性等をまとめて表2に示す。旋削、フライス切削実験ともに以上のような条件で適当に工具摩耗の観測、測定を行い、結果を検討、さらに若干の追加実験も行った。

3. 実験結果

3.1 旋削実験

旋削加工では切れ刃に衝撃は作用しないためセラミック工具はその性能を発揮しやすいものと思われる。それでも、 $H_{RC}50$ を越える被削材、特に SKH, SKD

Table 1 Chemical compositions of work material

Work	Chemical compositions (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
JIS SNCM630	0.31	0.21	0.48	0.09	0.18	2.69	2.70	0.55	0.77

Table 2 Details of used cutting tools

Tool material	Chemical compositions	Rapture strength	Chamffering	Tool geometries
Carbide P10	—	150 kgf/mm ²	—	Turning; (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8)
Carbide P20	—	160 kgf/mm ²	25°, 0.05 mm	Face milling; Radial rake angle = -5°
Ceramic C	Al_2O_3 80% TiC 20%	75 kgf/mm ²	30°, 0.10 mm	Axial rake angle = -6° Corner angle = -25°

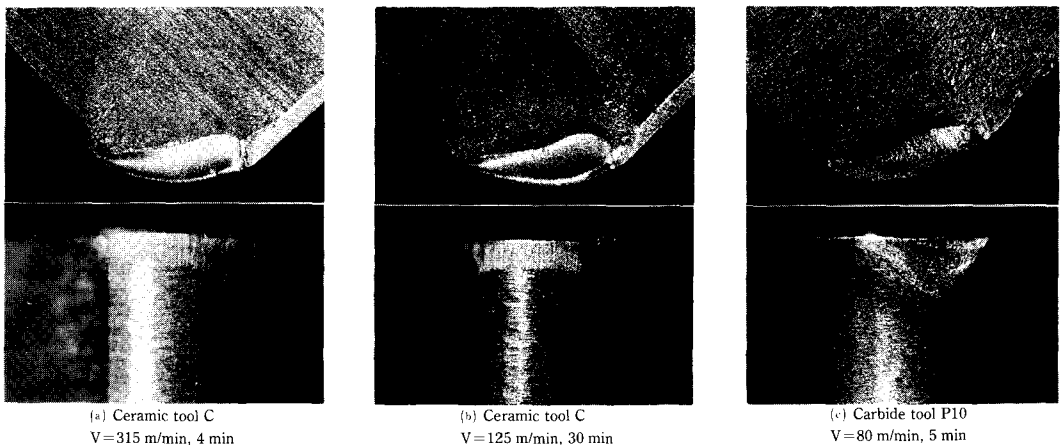


Fig. 1 Wear patterns of tested tools in turning of hardened JIS SNCM630 steel
Depth of cut; 0.5 mm, Feed; 0.14 mm/rev

材の場合には CBN 工具の方が良い性能を示すことが考えられる。そこでここでは中硬度高靱性の被削材として SNCM630 を選択した。この材料は Ni, Cr, Mo を含む 高強度鋼であり、硬さの割に被削性は悪くなっているようである。図 1 に各工具でこの SNCM630 を旋削した場合の工具摩耗形態を、また図 2, 図 3 に工具摩耗進行曲線を示す。超硬工具では実用的に切削可能な上限の切削速度は 80 m/min であり、125 m/min では約 8 秒で寿命に達してしまい、80 m/min の場合でもノーズ部にかなり変形が生じてい

る。反面、セラミック工具では全速度域で正常な切削が可能であり、明瞭なクレータ摩耗と前、横逃げ面摩耗の発生が観察できる。摩耗量については、超硬工具ではクレータ摩耗の進行に比べ、横逃げ面摩耗の方が急速に増加する。これに対して、セラミック工具では逆に S55C 程度の被削材では通常発生しないようなクレータ摩耗が急速に進展していることが特徴的である。これらのことから、SNCM630 のように焼入鋼としては比較的低硬度でも強度のある材料では、超硬工具では工具材としての硬さが不足であり、低速切削

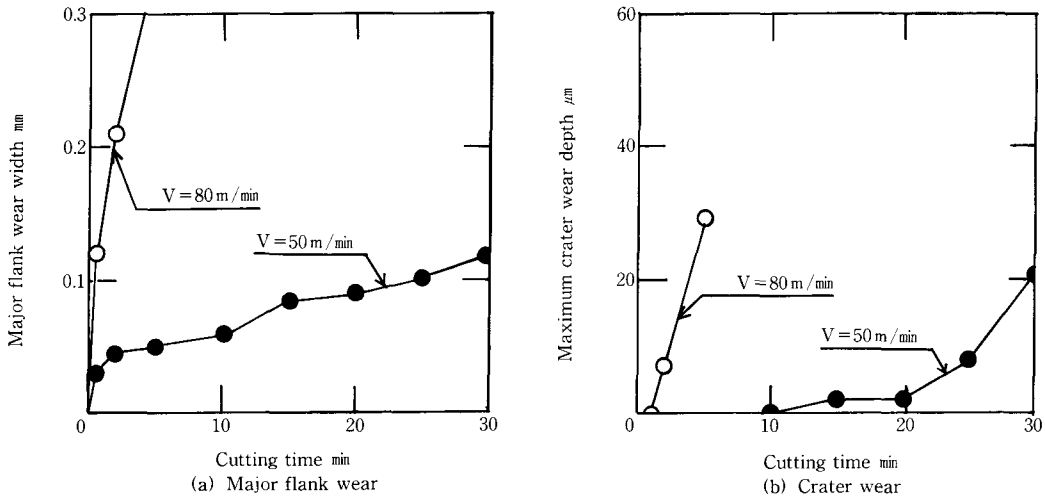


Fig. 2 Wear progress curves of tested P10 carbide tools in turning of JIS SNCM630 steel
Depth of cut; 0.5 mm, Feed; 0.14 mm/rev

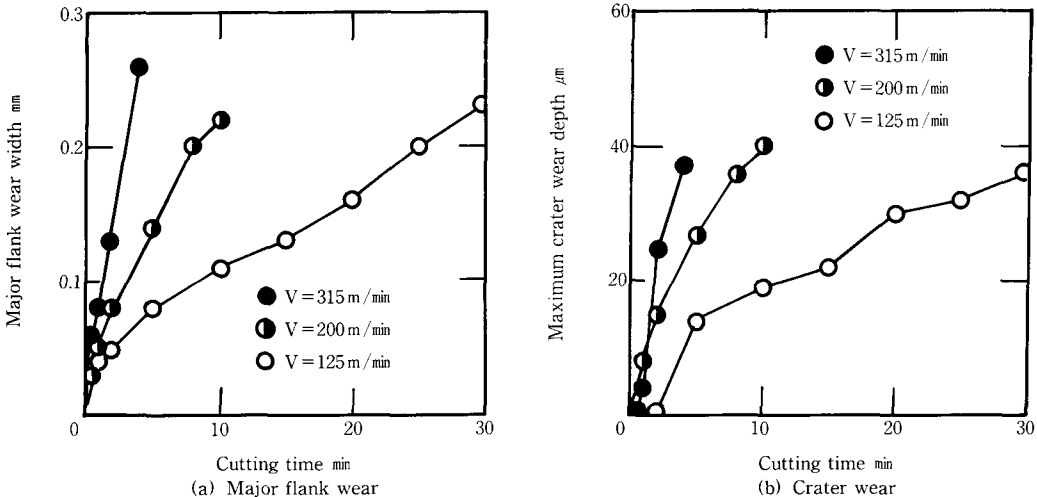


Fig. 3 Wear progress curves of tested Tic added cemic tools in turning of JIS SNCM630 steel
Depth of cut; 0.5 mm, Feed; 0.14 mm/rev

を行わざるを得ず、また逆にセラミック工具では本来の優位性が十分発揮できる状況となっている。それでもクレータ摩耗深さから考えるとさらに高温下での耐摩耗性が必要と思われ、純 Al_2O_3 系の工具を選択する方が良くも考えられる。次に工具寿命基準を横逃げ面摩耗幅 0.2 mm として工具寿命線図を描いたものを図 4 に示すが、全速度域、特に高速側になるほどセラミック工具が超硬工具に比較して優れた性能を示すことが明らかである。

このように工具摩耗形態、摩耗進行状況、工具寿命時間から考えてセラミック工具は十分焼入鋼の旋削に適応できるものと考えられる。

3.2 フライス切削加工

靱性を向上させるために添加剤、粒径等の面で改善されたセラミック工具が鋼材の正面フライス切削に利用できる可能性があることはすでに報告したが、安定性の面から考えると焼入した構造用合金鋼の連続切削を行うにはさらに大きな困難があるものと思われる。そこで今回はまずその手がかりを得ることを目的として硬さを変えた数種の S55C の焼入材の正面フライス切削実験を行った。まず各工具で各硬度の被削材を切削した場合の典型的な損傷形態を図 5, 6 に示す。超硬工具の場合、 $H_R C30$ 以下では正常な摩耗状態となっており、すくい面には典型的な熱裂が発生しているのがわかる。 $H_R C45$ の材料では切削条件によらず超硬工具は刃先が大きく欠損、脱落して切削不能となっている。これに対してセラミック工具ではどの被削材の場合でも正常な摩耗形態であり、横逃げ面摩耗はほとんどみられないもののクレータ摩耗は大きくな

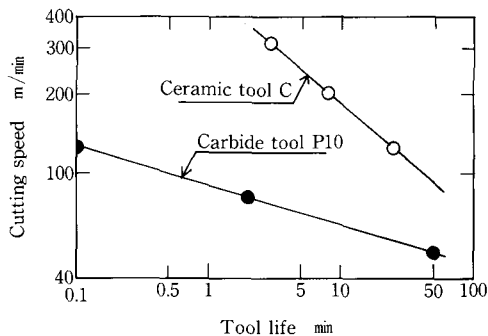


Fig. 4 Tool life curves of tested tools in turning of JIS SNCM630 steel
Tool life criteria; $V_B=0.2$ mm or tool breakage, Depth of cut; 0.5 mm, Feed; 0.14 mm/rev

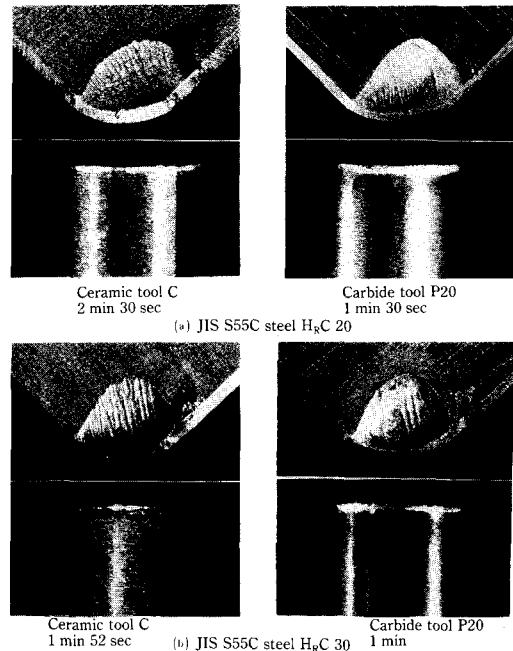


Fig. 5 Wear patterns of tested tools in face milling of JIS S55C steel
Cutting speed; 340m/min, Depth of cut; 0.5 mm, Feed; 0.38 mm/tooth

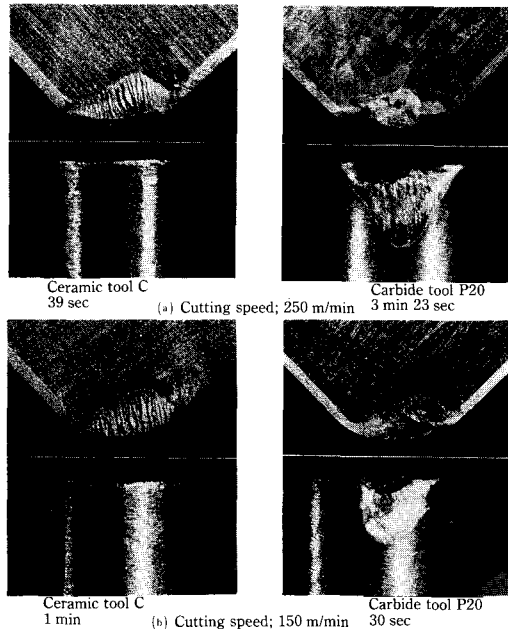


Fig. 6 Wear patterns of tested tools in face milling of hardened JIS S55C steel
Work hardness; $H_R C45$, Depth of cut; 0.5 mm Feed; 0.32~0.33 mm/tooth

っている。またクレータ摩耗部には熱き裂がみられるが低硬度材では浅く、高硬度材になる程深くなっている。このことから同一切削条件でも高硬度材では切れ刃に作用する熱衝撃が大きくなっていることが推察できる。ただセラミック工具に発生する熱き裂は工具の熱伝導率が低いことから工具表面にとどまっておき、超硬工具のように工具の深層部に達したき裂によって直接工具が欠損することは少ないものと考えられる。

次に工具摩耗進行状況の例として中硬度の $H_{RC}30$ 材を切削した場合の横逃げ面摩耗およびクレータ摩耗進行曲線を図7, 8に示す。横逃げ面摩耗は工具による差はあまりみられず、摩耗量も 0.15 mm に達する前に工具が寿命に到達し、フライス加工の場合には寿命基準になりにくいようである。クレータ摩耗についてはセラミック工具の方が超硬工具よりも少なく、切削速度が高くなる程その傾向が強くなっており、 250 m/min 以上では2倍以上の差が生じている。このクレータ摩耗は絶対値も大きく、切れ刃の強度を低下させる可能性もあるのでフライス切削の場合には工具寿命基準の1つと考えてよいであろう。ただいずれの場合でもセラミック工具では通常の寿命基準値に達しない時点で欠損が生じており、切削速度と欠損までの切削時間を考慮すると衝撃回数も欠損を生じさせる大きな要因となっていると考えられる。次に被削材の硬さとクレータ摩耗進行状況の関係を図9に示す。超硬およびセラミック工具とも高硬度材料ほど摩耗進行速度は速く、両者の傾向はよく一致している。ここでは切削速度 150 m/min の場合を示したが、高速域では低硬度材の場合、図9とは逆にセラミック工具の方が極端に摩耗量は減少する。

正面フライス切削実験のまとめとして、各硬度の被削材を切削した場合の工具寿命線図を図10に示した。寿命基準は最大クレータ摩耗深さ $50\text{ }\mu\text{m}$ もしくは工具破損とした。これまでに述べたように低硬度材では特に低速域において超硬工具が長寿命となり、中硬材では両工具ともほぼ同じとなっている。また高硬度材では逆にセラミック工具の方が優れていることがわかる。

4. 検 討

以上の実験結果によりセラミック工具は焼入鋼の旋削加工には十分使用できるものの、フライス切削を行うにはかなりの問題点があることがわかったので、これについてさらに検討を行ってみることにした。

ダイヤモンド工具や CBN 工具を除いて、一般的に

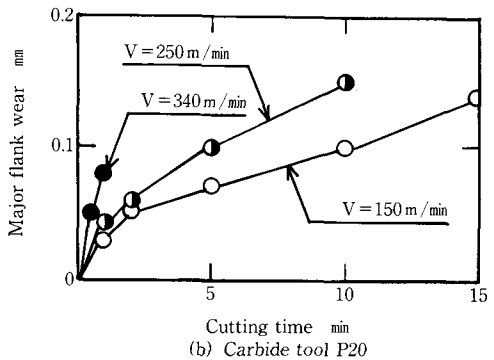
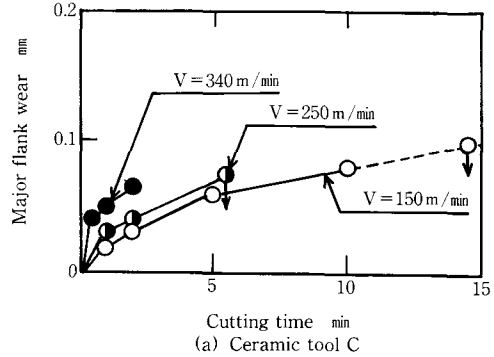


Fig. 7 Flank wear progress curves of tested tools in face milling of JIS S55C steel Work hardness; $H_{RC}30$, Depth of cut; 0.5 mm , Feed; $0.32\sim 0.38\text{ mm/tooth}$

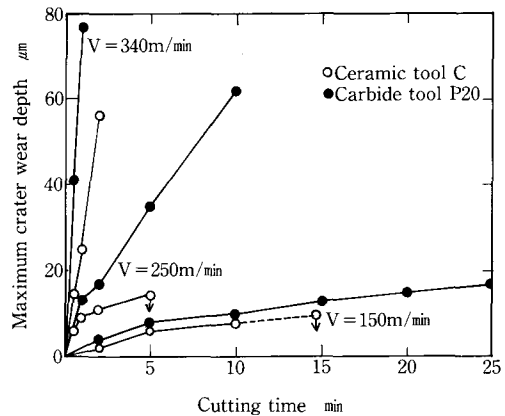


Fig. 8 Crater wear progress curves of tested tools in face milling of JIS S55C steel Work hardness; $H_{RC}30$, Depth of cut; 0.5 mm , Feed; $0.32\sim 0.38\text{ mm/tooth}$

使用できる工具のなかではセラミック工具は切削工具の具備すべき条件のうち、硬さについてはほぼ最高と言える条件をもっている。反面靱性についてはかなり向上している現在でも、超硬工具と比較すると極めて低い水準にある。またこの切削工具としての靱性を評価する方法は確立されているとはいえず、単なる抗折力や断続旋削試験における寿命回数で優れているだけでは実際に欠損しにくい工具とは断定できないところに問題がある。現に本実験で使用したセラミック工具より後に開発され数値的には 80 kgf/mm^2 を越える抗折力をもった工具を試験的に使用してみたがむしろ耐欠損性は低かった。こうした点から考えるとセラミック工具による鋼材のフライス切削を行うためには次のような点を考慮する必要があるものと思われる。

① エンゲージアングルについて

フライス切削ではエンゲージアングル、ディスエンゲージアングルが切れ刃に作用する衝撃力に大きな影響をおよぼすことはよく知られている⁴⁾が、セラミックのように低靱性の工具ではこれが問題となることは明らかである。そこで図11(a)のように幅 45 mm の S55C をカッターの中心からオフセットさせ $0 \sim 90^\circ$ まで 7 種類のエンゲージアングルを選び欠損までの工具寿命を調査してみた。その結果が同図(b)である。この実験でも従来超硬工具で研究されて来たようにエンゲージアングルが 30° 以下になると急速に工具寿命が延びる結果となっている。けれどもこのオフセットに

よる切削方法ではエンゲージアングルが変化すると同時にディスエンゲージアングルも変化し、しかもそれが中心削りにおいて被削材幅やカッター径を変化させる場合とは異なった値をとることになり、両者の実験結果がそのまま一致しなくなってくる。これを防ぐには小径カッターを用いて図12のようにカッター片側（できれば両側）が常に被削材の内側にある切削方法をとることが考えられ、かなりの寿命延長ができるとも報告⁵⁾されている。しかしいずれの様式をとっても正面フライス切削では必ず切削始めと終わりの状態が発生し、エンゲージ、ディスエンゲージアングルが連続的に変化し、欠損が生じやすい状態での加工をさけることができない。この部分では最終的に工具の耐欠損性に頼らざるを得ないのが現状であるが、それでも NC 工作機械を用いる場合には有利な工具軌跡を選択できる余地は残されており、そのためのソフトウェアの開発も必要であろう。

② 工具の突発的欠損について

セラミック工具で正面フライス切削を行う場合、本来の靱性の低さから寿命までの切削時間や衝撃回数にばらつきが生じることが多い。この点を調査するために 95 mm 幅の被削材の中心削りを同一条件で10回繰り返してみたが、やはり工具寿命時間にして30秒から3分間、衝撃回数にして1100から7500回と大きなばらつきがみられた。勿論、先に述べたエンゲージアングル等の影響も入ってはいるが、工具自体のばらつきも

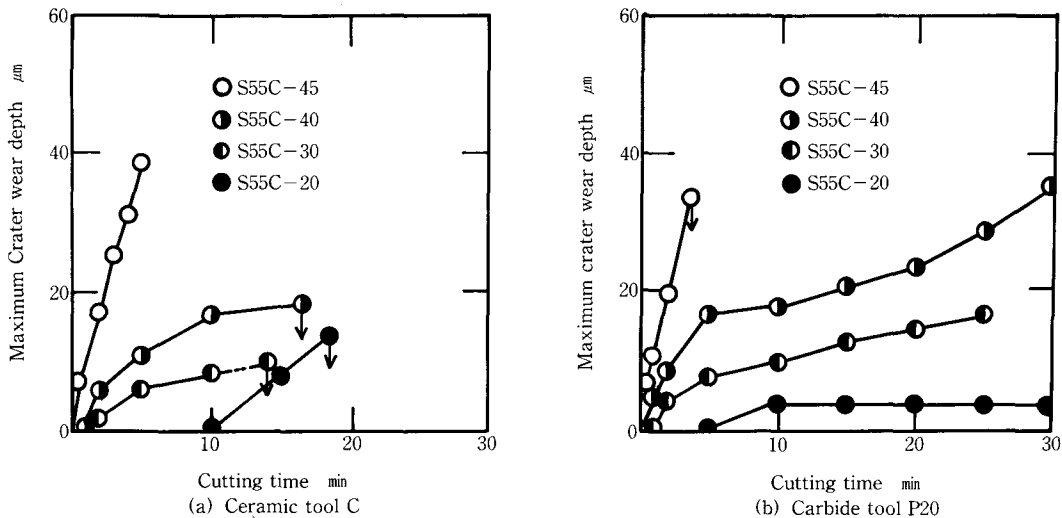


Fig. 9 Relationship between crater wear progress and work hardness in face milling of JIS S55C steel
Cutting speed; 150 m/min, Depth of cut; 0.5 mm, Feed; 0.33 mm/tooth

かなり影響しているものと思われる。このうち粒径、焼結方法、内部欠陥等の要因については工具メーカーの開発を待つしかないが、切れ刃の品位および信頼性については、使用者側によるチャンファー付けやダイヤモンドラッピングを実施することにより相当に向上させられることが期待できる。

また、微小な欠損を起こした工具でそのまま切削を続けると、かえって切味が向上する現象も度々みられたので工具形状の検討（すくい角やチャンファー幅の選定）も今後の課題であろう。

総じてセラミックのように一部の性質が極めて優れている切削工具を有効に利用するには工具自体の形状設定や加工条件の選択、工作機械、取付具等の周辺機器の設定といった総合的な環境を高度に限定して加工を行う必要があるが、新しい世代の高靱性セラミック工具が入手できる状況となって来ており、今後さらに鋼材の切削実験を重ねる必要があるものと思われる。

5. 結 論

焼入した SNMC630, S55C をセラミックおよび超

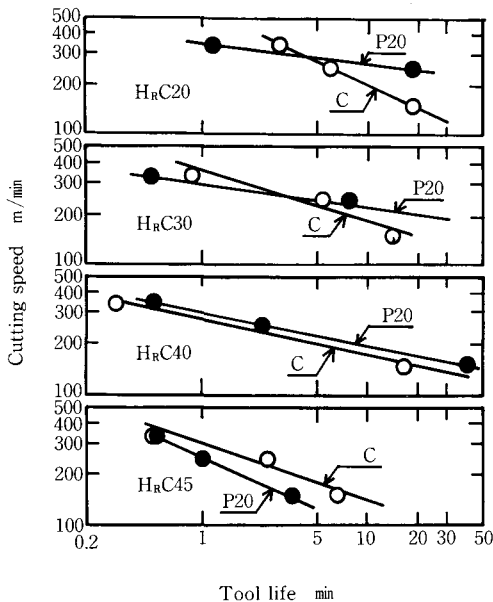
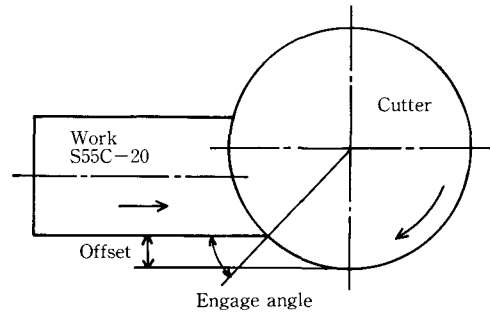
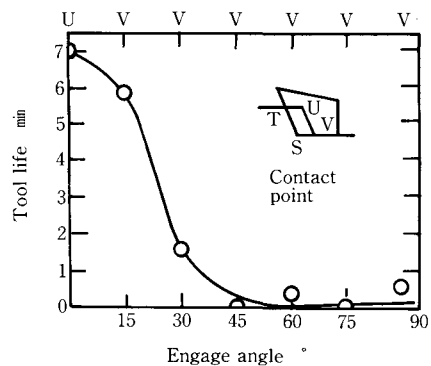


Fig. 10 Tool life curves of tested tools in face milling of JIS S55C steel
Tool life criteria; crater wear depth = 50 μm or tool breakage, Depth of cut; 0.5 mm, Feed; 0.32 ~ 0.38 mm/tooth



(a) Experimental method of offset milling to vary cutter engage angle



(b) Tool life under various engage angles

Fig. 11 Relationship between tool life and engage angle in face milling of JIS S55C steel

Work width; 45 mm, Cutter diameter; 160 mm, Cutting speed; 250 m/min, Depth of cut; 1 mm, Feed; 0.2 mm/tooth

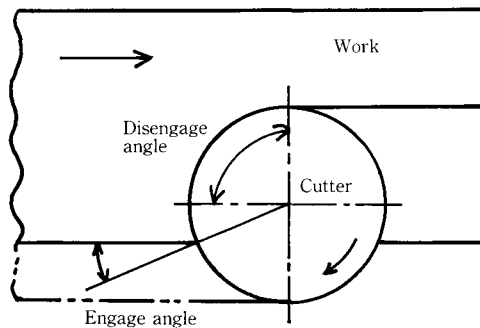


Fig. 12 Recommended cutter offset which presents constant disengage angle

硬工具で旋削，正面フライス切削した結果，次のようなことが明らかになった。

- 1) SNCM 630 材，硬さ $H_R C35$ 程度の焼入鋼は現状のセラミック工具で十分旋削可能であり，超硬工具と比較して特に高速切削領域でセラミック工具は極めて優れた性能を示す。
- 2) S55C の焼入材を正面フライス切削する場合，被削材の硬さが $H_R C40$ を越えるとセラミック工具は超硬工具よりも有利に使用できるが， $H_R C30$ 以下の材料では耐欠損性の点から超硬工具の方が良い寿命を示す。
- 3) セラミック工具の特徴を活して焼入鋼のフライス切削を行うには，被削材硬さ，工具材種，加工条件，切削方式等を十二分に検討することが必要である。

謝 辞

本実験に使用した工具は国内各メーカーに御提供をいただいたもので，関係各位に御礼申し上げます。また本研究の一部は昭和56，57年度の卒業研究として実施されたもので，実験に熱心に協力された当時の卒業

研究生，砂野義房（現宮川化成工業），平山悦生（現平山商店），立川義彦（現デルタ工業）の各君に心より感謝致します。

文 献

- 1) 鳴瀧則彦，越智秋雄，浦辺哲士：S45C の正面フライス切削時のセラミック工具の損傷，精密機械 43，(1977) 591.
- 2) 鳴瀧則彦，山根八洲男，武内睦朗：CBN 工具の摩耗，精密機械，45，2 (1979) 201.
- 3) 大谷敏昭，藤瀬健領，横川 渉，三井武良男：CBN およびセラミック工具による焼入鋼の旋削，精密機械，49，6 (1983) 804.
- 4) 星 光一，星鐵太郎：金属切削技術，工業調査会 (1969)
- 5) 鳴瀧則彦，山根八洲男，臼杵 年，岡野哲彦，竹田原浩：高硬度材の正面フライス加工および旋削加工，昭和62年度精密工学会広島地方学術地方講演会講演論文集，(1987) 47.