研 究

S 45 C の正面フライス切削時の セラミック工具の損傷*

鳴 瀧 則 彦** 越 智 秋 雄*** 浦 辺 哲 士†

Wear of Ceramic Tools in Face Milling of Medium Carbon Steel

Norihiko NARUTAKI, Akio OCHI, Tetsushi URABE

In order to investigate the application of ceramic tools in intermittent cutting, face milling test was conducted on 0.45% carbon steel with several ceramic, carbide and cermet tools. The wear patterns, the wear rates and the tool life were measured and also crater wear was observed precisely with an optical and an electron microscope. Obtained data were analysed to evaluate the wear characteristics of ceramic tools in comparison with those of carbide and cermet tools. Main results obtained are: 1. Ceramic tools are applicable for face milling without tool failure under the selected cutting conditions. 2. Crater wear rate of ceramic tools in face milling is much higher than those of another machining methods. Consequently, 50 μ m of maximum crater wear depth is considered to be the suitable tool life criteria from the view point of tool failure. 3. Thermal cracks parallel and normal to the cutting edge are observed in the crater wear region of ceramic tools. Since these cracks in ceramic tools are not so deep as those of carbide and cermet tools, it is considered that they are not essential for the tool failure.

1. 緒 言

近年、セラミック工具は、成分や焼結方法の改善により特にじん性の点で飛躍的な性能向上を示している。この点に注目してこれまでにいろいろの角度からその切削性能や損傷機構を検討してきた¹⁾²⁾が、その結果、鋼、鋳鉄の長手旋削において優れた性能を示すとともに、切れ刃は適当なホーニングを施せば、ある程度の断続切削に耐え得ることが明らかになった³⁾。もしセラミック工具がフライス切削に使用できれば、その優れた耐摩耗性により加工能率や精度が大きく向上することが期待できる。従来、セラミック工具による断続切削に関しては二三の研究が行われている^{4)~6)}のみで、鋼切削への適応性やその際の損傷について詳細な検討を行ったものはほとんど見られない。そこで、本研究ではセラミック工具による炭素鋼の正面フライス切削を、超硬工具およびサーメット工具と比較して行い、工具の損傷状態を詳しく観察することによって、正面フライス切削に対するセラミ

ック工具の適用性を検討し、さらにセラミック工具の損傷機構解明および工具性能向上の手がかりを得ることを目的としたものである。

2. 実験装置および方法

実験はニータイプフライス盤(1.5番, 3.7kW)を用い、主軸にスローアウェイカッタを取付けて正面フライス切削を行った。カッタは直径 150 mm で、これに 1 枚の切削用チップ(旋削用スローアウェイチップ, SNP 432 型)およびバランスウェイトを挿入して使用した。工具はセラミック工具 3 種類(記号 C, H, I)、比較用としての超硬工具 P 20 およびサーメット工具の計 5 種類を用いた。セラミック工具のうち、C および H は TiC を含有したホットプレス製品で比較的じん性が高く、この 2 種類を中心とし、純アルミナ系の工具 I を参考として使用した。これらの工具の詳細および取付形状を表 1 に示す。

表 1 各工具の性質および形状

	成分*(%)	抗折力* (kg/mm ²)	プリホーニング		工具形状
			ランド角	ランド幅 (mm)	
セラミック工具 C	Al ₂ O ₃ 80 TiC 20	75	30°	0.10	ラジアルレーク —5°
セラミック工具 H	Al ₂ O ₃ 60 TiC 40	60~80	30°	0.15	アキシアルレーク —5°
セラミック工具 I	Al ₂ O ₃ 100	50~60	20°	0.20	コーナアングル 25°
超硬工具 P 20	—	160	25°	0.05	ノーズ半径 0.8 mm
サーメット工具	—	110~130	20°	0.08	

* 成分、抗折力はいずれもメーカ発表値による

被削材は機械構造用炭素鋼 S45C の角材を用い, その寸法は幅 95mm, 高さ 95 mm, 長さ 500 mm である. 切削方法は被削材の中心とカッタの中心を合わせてオフセット 0 とした. これによりエンゲージアングルはディスエンゲージアングルと等しく 41° , V 接触となる.

切削条件は, 切削速度を 99~340 m/min の間で変化させ, 送り量は 0.2, 0.4 mm/tooth の 2 種, 切込みは 1 mm の一定とした. 実験中, 適当な間隔で工具摩耗の測定および観察を行い, これを工具が欠損するか, あるいはその直前と思われるまで続けた. また, 実験終了後, 工具をそのままあるいは切断研磨して, 金属顕微鏡, 走査型電子顕微鏡 (以下 SEM と略記) 等によって詳細に観察した.

3. 実験結果および考察

3.1 工具損傷および工具寿命

フライス切削などの断続切削では, 工具に機械的および熱的な衝撃が加わり, セラミック工具のようにじん性が乏しく, かつ熱伝導率の低い材料にとっては, それぞれが機械的な欠損や熱き裂の発生とそれによる欠損の直接的な原因となる. こうした悪条件に性能の向上した現在のセラミック工具がどの程度耐え得るかを調査し, 各切削速度での損傷状態をまとめたものを表 2 に, また代表的な摩耗形態を図 1 にそれぞれ示す. 図 1 は切削速度 250 m/min, 送り 0.4 mm/tooth での, 3 種の工具の摩耗形態であるが, セラミック工具でも図のように全く欠損は生じておらず, 工具 C, H と摩耗形態に差はみられない. ただし, 切削時間 (カッタ回転時間, ことわらなければ以後同じ) は 10 min 程度で比較的短時間であるにもかかわらず, 最大クレータ深さがセラミック工具で $50 \mu\text{m}$, 超硬工具で $230 \mu\text{m}$ にも達している. セラミック工具でこのように大きなクレータ摩耗が生じることは, 旋削の場合と大きく異なっている*. このことから断続切削では連続切削と異なっており, 機械的, 熱的な衝撃が工具摩耗に大きな影響を及ぼしていることがわかる. クレ

表 2 セラミック工具 C の正面フライス削り時の損傷状態 (送り: 0.4 mm/tooth**)

切削速度 (m/min)	切削可能時間* (min)	損 傷 状 態
99	14~21	比較的短時間で, 摩耗が進行しないうちに突発的に欠損する. 純 Al_2O_3 の工具では 4~8 min で欠損する.
137	40~48 以上	$K_T=5 \mu\text{m}$, $V_B=0.1 \text{ mm}$ 程度で摩耗進行が鈍い.
184	88 以上	70~80 min 位で $K_T=50 \mu\text{m}$ となる. 安定しており, 欠損は生じにくい.
250	12	10~12 min 位で $K_T=50 \mu\text{m}$ となり, これを越えると欠損を生じやすい.
340	2	クレータ摩耗進行が著しく早く 2 min で $60 \mu\text{m}$ 程度になり, これを越えると欠損する.

* 欠損あるいはその直前までの切削時間

** 送り 0.2 mm/tooth では摩耗進行速度がかなり遅くなる

切削速度: 250 m/min, 切込み: 1 mm, 送り: 0.4 mm/tooth

図 1 S45C の正面フライス削り時の各工具の損傷形態

ータ摩耗底部にはくし刃状の溝が, 超硬工具およびサーメット工具で数本, セラミック工具では非常に多数観察され, 工具材質の熱伝導率が低くなるに従ってその本数が増えている. こうしたくし刃状の溝は過去の多くの研究⁷⁾を参照すれば, 工具に発生した熱き裂であることが推察される. またフランク摩耗については各工具とも形態上目立った差はないが, セラミック工具では付着物が存在し, 超硬工具ほどははっきりとしたすきとりの摩耗は観察されず, ノーズ付近に微細なチッピングがみられる程度である.

* 工具 C で S55C を旋削する場合と比較すると, 切削条件等に多少の差はあるが, フライス切削では, クレータ摩耗速度が 10~35 倍, フランク摩耗速度が 8~16 倍になる. また, 旋削では $K_T=50 \mu\text{m}$ に達するかなり前に V_B が 0.3 mm を越えてしまう.

(a) フランク摩耗進行状況

(b) クレータ摩耗進行状況

切込み: 1 mm, 送り: 0.4 mm/tooth

図2 セラミック工具CでS45Cを正面フライス削りした場合の工具摩耗進行状況

次に図2に各切削速度におけるセラミック工具Cのフラング摩耗およびクレータ摩耗の進行状況を示す。この図は送り量が 0.4 mm/tooth の場合であるが、0.2 mm/tooth の場合には摩耗速度が50%程度遅くなる。また工具Hの場合もほぼ同様である。二つのグラフから、フラング摩耗幅は旋削実験でよく用いる寿命基準 0.3 mm を越えることはなく、切削時間および切削速度に関して比較的鈍感であることがわかる。逆に最大クレータ深さの方は時間、速度による摩耗量の差が明りょうに現れ、しかもそれが 50 μm を越えた時に工具が欠損する場合が度々みられたので、最大クレータ深さの方が工具寿命に関しては支配的であり、寿命基準として考えてよいであろう。したがって本研究では以後クレータ摩耗に着目し、切削性能や工具損傷について検討することにした。

図3は切削速度 250 m/min の場合の各工具のクレータ摩耗進行状況を示したものである。工具C, H, ついでIがもっとも優れた耐摩耗性を示し、さらにサーメット工具、超硬工具の順になる。工具C, HはTiCを含有している点と焼結方法が同じであるのでほとんど差はみられないが、高速側でCがHより優れているのは、TiCの含有量の相違によると思われる。工具Iは純 Al_2O_3 製で、

切削速度: 250 m/min, 切込み: 1 mm, 送り: 0.4 mm/tooth

図3 各工具のクレータ摩耗進行状況の比較

切込み: 1 mm, 送り: 0.4 mm/tooth, 寿命基準 $K_T=50 \mu\text{m}$

図4 各工具の正面フライス削りにおける工具寿命線図

コールドプレス製品なので、工具C, Hとの摩耗速度の差が出たのであろう。ただ、粒径が均一なこと、ホーニング幅が他より広いことなどにより欠損が生じにくいものと思われる。いずれにしても、これまでに示した結果から、おおむね 137~184 m/min 以上の切削速度では、クレータ深さが 50 μm を越えない範囲で初期欠損や突発的な欠損を生じることなく正面フライス切削を行うことができると考えられる。

図3の摩耗進行図から $K_T=50 \mu\text{m}$ を基準にして $V-T$ 線図を描くと図4が得られる。 K_T 基準であるためにCの値が少し小さいが、セラミック工具C, H, I, ついで超硬工具P20の順に良い寿命となっており、サーメット工具の場合、切削速度の影響が他ほどみられず、異なった n の値をとっている。超硬工具でグレードがP20の場合、じん性がきわめて高く、 $K_T=250 \mu\text{m}$ に達しても欠損が起こらないことがあるので簡単に優劣を判断することはできないが、この図4からセラミック工具の優れ

た切削性能は断続切削の場合にも十分発揮されると考えて良いであろう。

(a) 切削速度 340m/min の場合

(b) 切削速度 250m/min の場合

工具: H, 切込み: 1 mm, 送り: 0.4 mm/tooth
図 5 光学顕微鏡によるセラミック工具のすくい面摩耗部写真

3.2 工具損傷機構の検討

切削条件を選択して欠損することなく切削可能となった場合には、セラミック工具はすでに図 1 に示したように旋削とは大きく異なった摩耗状況を示す。ここではそのうちクレータ摩耗について詳細な観察を行い、損傷の原因について考察を行った。

図 5 は工具 H のすくい面摩耗部を光学顕微鏡により高倍率で観察したものである。これよりクレータ内には切れ刃に垂直な溝がきわめて多く発生しているのがわかる。このようなクレータ部の溝は切削速度が高い方が明りょうであるので、それを SEM により観察したものを図 6 に示す。これは切削速度 340 m/min の場合で、図 5 と同様に多数の切れ刃に垂直およびこれらを連結する平行な溝が認められる。こうしたクレータ摩耗部の網状の溝は Miles らのいう comb-cracking⁸⁾とも異なり、また坂本ら⁵⁾、杉田ら⁴⁾等の報告にもこのように明りょうな摩耗形態はみられない。こうした網状の溝はセラミック工具に特有なもので、サーメットあるいは超硬工具の場合には、図 1 で示したようにわずか数本の細い線がみられるだけである。

いずれにしても過去の多くの研究から、どの工具の場合もこうしたすくい面上の溝や線はすべて工具

工具: H, 切削速度: 340 m/min
図 6 SEM によるセラミック工具のすくい面摩耗部写真

図7 SEMによるセラミック工具Cのすくい面切断部の観察

図8 SEMによるサマーセット工具のすくい面切断部とき裂部分写真

内部にくい込むフライス切削特有の熱き裂（切れ刃に垂直な熱き裂およびすくい面横熱き裂⁹⁾）と考えられ、工具を欠損させる大きな原因となっていると思われる。そこで、この点を確認するために各工具を切れ刃から 15° ほど傾けてすくい面に垂直にダイヤモンドホイールで切

断，研磨してみた。この結果，超硬工具およびサマーセット工具には予想どおり，数本の工具内に入り込んだき裂が見られたが，予想に反してセラミック工具の場合にはこのようなき裂は全く見られなかった。図7，図8はこのことを示したもので，SEMを用いてセラミック工具

C およびサーメット工具の切断面を高倍率で観察した写真である。これらの図からわかるようにセラミック工具には工具内部へ入り込むき裂は存在しておらず、サーメット工具の場合には内部へ入るき裂をはっきりと確認することができる。

従来、セラミック工具はその物理的性質から考えて断続切削では熱衝撃によりき裂が入りやすく、それが工具の欠損につながると考えられてきたが、これまでの実験結果では少なくとも直接的に工具の強度を低下させ欠損に導くようなき裂の発生はないことが明らかである。このことは結局、セラミック工具に発生するき裂は従来考えられてきたような工具内部へ入り込む深いき裂ではなく、すくい面上に見られる網状の溝を生じさせる程度の微小なき裂であると考えられ、これは図7からわかるように深さがせいぜい10~20 μm 程度のものである。したがって、この程度の微小なき裂は、直接工具の欠損には影響しないで、先に述べた工具摩耗の促進にのみ影響していると考えてよいであろう。そして、セラミック工具のき裂が超硬工具やサーメット工具に比べて浅いのは、過去の研究¹⁰⁾を参考にすると、セラミック工具の熱伝導率が低く、熱影響が他の工具ほど深い部分にまで及ばないためであると推察できる。

最後にこれまでに示した実験結果からセラミック工具の損傷機構の検討を行ってみると次のようになる。

① 逃げ面にはき裂は発生せず、ノーズ部付近が工具材の低いじん性によって少しずつチップングを起こしていく。機械的な衝撃が加わるので当然旋削よりも摩耗速度ははやいが、その絶対量が少ないため工具の性能を左右する因子とはならない。② すくい面には熱および機械的応力が作用して網状の浅い熱き裂が発生して、切削の進行とともに工具材表面層が持ち去られ、またき裂が入ることが繰り返される。このためクレータ摩耗の進行速度が非常にはやくなる。こうした機構は杉田らが鋳鉄切削時の逃げ面の損傷のモデルとして説明したもの¹¹⁾とほぼ同じであるが、逃げ面ではなくすくい面がこのように摩耗するのは被削材が鋼であり、切りくずの形態や強度が鋳鉄と全く異なることによるのであろう。こうしてクレータ深さがある程度以上に大きくなると旋削の場合と同じように割れ¹⁾が前逃げ面、横逃げ面に発生し、工具が欠損してしまう。このようにクレータ摩耗深さは、工具の最終的な寿命を支配する重要な因子となるので、工具のじん性を維持して耐クレータ摩耗性を向上させれば、超硬工具に比べて高速の正面フライス切削を行うことが可能になるであろう。

4. 結 論

被削材にS45Cを選び、セラミック工具による高能率の正面フライス切削の可能性を切削実験によって検討した結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) 本実験のように切削条件を選択すれば、市販のセラミック工具によって欠損なしに鋼材の正面フライス切削を行うことができ、それは超硬工具、サーメット工具に比べて切削速度の点ではるかに優れている。
- (2) 鋼の正面フライス切削時のセラミック工具の摩耗は、逃げ面については形態、絶対値ともに問題はないが、すくい面については摩耗の進行速度がきわめてはやく、最大深さ50 μm を欠損を生じない範囲として、寿命基準と考え得る。
- (3) クレータ摩耗部には、浅い切れ刃に垂直および平行な熱き裂が生じる。これらのき裂は超硬あるいはサーメット工具と異なって工具内部へ進展していないので、欠損にではなく(2)項の摩耗進行にのみ影響を及ぼしているものと思われる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、工具は国内各メーカーに、また被削材は大同製鋼(株)に、それぞれ御提供をいただきました。関係各位にお礼申し上げます。

文 献

- 1) I. Ham & N. Narutaki: Wear Characteristics of Ceramic Tools, Trans. ASME, **95**, 4, (1973) 951.
- 2) 鳴瀧則彦, 村越昭男: セラミック工具の摩耗に及ぼす鋼材中の微量介在物の影響, 精密機械, **42**, 3 (1976) 221.
- 3) 鳴瀧則彦, 村越昭男, 片島三朗: セラミック工具の損傷に関する研究, 第2報, 断続切削について, 昭和48年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1973) 391.
- 4) 杉田忠彰, 山田 巖: セラミックカッタの熱損傷(第1報), 精密機械, **30**, 8 (1964) 662.
- 5) 坂本正史, 中村 平: セラミック工具による炭素鋼の断続切削, マシニスト, **16**, 10 (1972) 71.
- 6) K.F. Meyer: Untersuchungen an keramischen Schneidstoffen, Ind. Anz., **11**, 6, (1962) 183(39).
- 7) 例えば, 星 光一, 星 鉄太郎: 金属切削技術, 工業調査会 (1969) 66.
- 8) J.W. Miles & P. Feltham: The Disintegration of Sintered Alumina Tool Tips, Int. J. MTDR, **11**, (1971) 63.
- 9) 奥島啓式, 星 鉄太郎: 超硬正面フライスにおける熱き裂(第2報, 工具破損との関連), 日本機械学会論文集, **28**, 193 (1962) 1055.
- 10) 杉田忠彰: セラミックカッタの熱損傷(第4報), 精密機械, **32**, 5 (1966) 357.
- 11) 杉田忠彰, 山田 巖: セラミックカッタの熱損傷(第3報), 精密機械, **30**, 10 (1964) 779.