研 究

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*

鳴 瀧 則 彦** 村 越 昭 男***

Effect of Small Quantity Inclusions in Steels on the Wear of Ceramic Tools

Norihiko NARUTAKI, Akio MURAKOSHI

Turning test was run on Ca-Si deoxidized steel, free cutting steel and normal carbon steel in order to examine the effect of non-metallic inclusions in steels on the wear of ceramic tools. The wear patterns, the wear rates and the tool life were measured and the adhered material on the tool worn surface was analyzed by an EPMA. Also, the reaction between the oxide inclusions and ceramic tools was examined by reaction tests and the relation between these data and the wear of ceramic tools was considered. The test results obtained are as follows:

(1) The life of ceramic tools in machining of Ca-Si deoxidized steel is shorter than that of normal carbon steel. This fact is completely opposite to that of carbide tools. And Ca and Si are detected on the worn surface of the ceramic tools which machined Ca-Si deoxidized steel.

(2) CaO or SiO₂ reacts with ceramic tool and Ca or Si invades into ceramic tool by diffusion and softens the tool matrix. The reaction of Ca is more predominant than Si and the distance of Ca invasion to the tool is larger than that of Si.

(3) MnS type adhesive layer on the tool surface protects the wear of ceramic tool effectively and prolongs the tool life.

1. 緒 言

セラミック工具は、現用の切削工具の中で最も高速切削に適し、耐摩耗性もすぐれている。従来はセラミック工具のじん性が低くてあまり実用的でないとされていたが、最近はこの点も大いに改良され、工具が切削初期に欠損してしまうといった現象はまれになり、摩耗によって最終寿命に達することが多くなった。このような状況下では、工具の摩耗が工具性能として重要な因子となり、その機構を解明することはセラミック工具の性能を向上させ、機械加工の能率を高める上できわめて有意義であると考えられる。

また、セラミック工具は Al₂O₃ が主体であるため化学的には安定であるように思えるが、この工具が使用されるような高温高圧のもとでは工具と被削材の間に化学的な反応や拡散などが起こって、これが工具摩耗の原因として相当重要になってくると考えられる。このことを示唆する論文も二三報告されている^{1)~3)}。

本研究は特に鋼材中の酸化物系および硫化物系の介在物とセラミック工具との反応に注目し、Ca-Si 脱酸鋼と

イオウ快削鋼を被削材としてとりあげ、切削実験を行った。さらに酸化物系の介在物とセラミック工具との反応実験を行い、両実験の結果から鋼材中の介在物がセラミック工具の摩耗に及ぼす影響を検討し、工具の摩耗機構を解明する一助とした。

2. 実 験 方 法

切削実験は無段変速装置を備えた高速旋盤を用い、乾式外丸削りを行った。被削材は直径 100 mm、長さ 550 mm の丸棒で、材種は機械構造用炭素鋼 S 15 C (記号 15-N)、イオウ快削鋼 SUM 2 (15-S)、機械構造用炭素鋼 S 55 C 普通鋼 (55-N) および S 55 C Ca-Si 脱酸鋼 (55-Ca) の 4 種類とした。各被削材の化学成分およびかたさを表 1 に示す。

工具は表 2 に示すような性質を持った 3 種類のセラミック工具 (記号 C, F および H) と比較用としての超硬工具 P 10 種の計 4 種類を用いた。工具はすべてスローアウェイ型で、その取付形状は (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8) である。

切削条件は切込み 1.0 mm、送り 0.2 mm/rev で一へとし、切削速度を 200, 325, 415 および 500 m/min の 4 段階に変化させた。実験ではあらかじめ定めた時間間隔で切削するごとに工具摩耗を工具顕微鏡で測定し、写真撮影した。工具寿命はフランク摩耗を基準とし、横述

* 原稿受付 昭和 50 年 3 月 29 日。昭和 48 年度精機学会春季大会学術講演会 (昭和 48 年 4 月 5 日) にて発表。

** 正 会 員 広島大学工学部 (広島市千田町 3)

*** 正 会 員 新興金属工業所 (広島市大州 5-6-28)

表1 被削材の化学成分およびかたさ

被削材 記号	化 学 成 分 (%)								ブリネル かたさ H_B
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ca	
15-N	0.14	0.19	0.58	0.011	0.021	0.08	0.05	—	123
15-S	0.13	0.18	0.65	0.014	0.160	0.10	0.04	—	115
55-N	0.52	0.27	0.77	0.028	0.012	0.07	0.14	—	212
55-Ca	0.54	0.29	0.78	0.014	0.020	0.11	0.11	0.006 1	220

表2 使用した工具の諸性質

工具材種	記号	抗折力 (kg/mm^2)	製 法	硬度 (R_A)	添加物
セラミック	C	75	ホットプレス	93.5~94.5	TiC
"	F	60	コールドプレス	93~94	—
"	H	60~80	ホットプレス	94	TiC
超硬 P 10	P 10	130~140	—	92.5	—

切込み: 1.0 mm, 送り: 0.2 mm/rev

図1 S55C普通鋼およびCa-Si脱酸鋼を切削した場合のセラミック工具および超硬工具の摩耗形態

げ面平行部摩耗幅 V_B が 0.2 mm に達した時を寿命とした。

切削実験終了後, 工具摩耗部表面の付着物を X 線マイクロアナライザ (以下 EPMA と略記する) によって分析

し, 付着物成分と工具摩耗の関連について検討した。

さらに酸化物系の付着物については, セラミック工具との反応を確認するための実験を行った。この反応実験ではセラミック工具と $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ あるいは $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ とを約 60 kg/cm^2 に加圧しながら接触させ, 1450°C で 1 h 保持した*。試料は空冷後反応面と垂直に切断し, 断面における各種元素の濃度を EPMA によって分析した。EPMA の使用条件は加速電圧 20 kV, ビーム径 2 μm , 試料電流 0.03~0.05 μA である。また試料のセラミック工具断面にはカーボン蒸着を行ってから分析した。

3. 実験結果および考察

3.1 酸化物系介在物

超硬工具で鋼を切削するときには, 製鋼時の脱酸生成物によって工具摩耗が大きく影響され, 特に Ca-Si 脱酸鋼を切削すると超硬工具表面にはいわゆる Belag が生じて工具の摩耗が大きく減少することが知られている^{5)~8)}。セラミック工具においても同様の付着物が発生するが, セラミック工具に対するこれら付着物の作用については十分に明らかにされているとはいいがたい。例えば, ドイツで行われた実験⁹⁾では Belag の発生によってセラミック工具の摩耗が減少したと報告されているが, 他方では全く逆の結果も報告されている²⁾³⁾。

本実験ではこの点を明確にするため, まず S55C 普通鋼 (Al 脱酸鋼) と Ca-Si 脱酸鋼とをセラミック工具および超硬工具で切削した。まず工具の摩耗状況を調査したが, 図1は一定の切削速度における工具の摩耗形態を比較

* セラミック工具で鋼材を切削するときの工具表面の温度は局所的に 1250~1600°C に達することが報告されており⁴⁾, 本実験で採用した 1450°C という温度は十分実値的な値である。また接触圧力は実際には本実験での値の 100 倍程度になるが, ここでは単に酸化物と工具とを密着させることを目的とした。

切込み: 1.0 mm, 送り: 0.2 mm/rev
図2 セラミック工具Fで55-Nおよび55-Caを
切削した場合のフランク摩耗進行状況

切込み: 1.0 mm, 送り: 0.2 mm/rev
図3 セラミック工具Fで55-Nおよび55-Caを
切削した場合のクレータ摩耗進行状況

した一例である。図1(a)はセラミック工具の場合であるが、摩耗の形態としてはクレータ摩耗が少なく、フランク摩耗は長方形をしている。またセラミック工具にありがちな切れ刃の欠損は生じていない。しかし55-Nを切削した工具の摩耗部にはすくい面、逃げ面共多数の条痕があり、その上に比較的厚みのある付着物が点在している。一方、55-Caを切削した工具では摩耗部表面が滑らかで、すくい面には薄くて一様なフィルム状の付着物が生じている。さらに、図の両工具はほぼ同様の摩耗状態であるが、これに達するまでの切削時間は55-Nでは6.5 minであるのに対し、55-Caでは0.5 minとなっている点が大きな差異である。

また図1(b)は超硬工具の場合で、クレータ摩耗が大きく現れており、フランク摩耗は長方形である。摩耗部の表面は割合滑らかで、55-Caを切削した工具のフランク摩耗部に薄い付着物が生じている。切削時間は55-Nに対して4 min、55-Caに対しては10 minで、セラミック工具に比べると切削時間の長短が逆転している。

次に、セラミック工具Fを例にとって時間を横軸、フランク摩耗幅あるいは最大クレータ深さを縦軸として工

切込み: 1.0 mm, 送り: 0.2 mm/rev, 寿命基準: $V_B=0.2$ mm
図4 セラミック工具(C, F, H)および超硬工具(P10)で
S55C 普通鋼を切削した場合の工具寿命線図

切込み: 1.0 mm, 送り: 0.2 mm/rev, 寿命基準: $V_B=0.2$ mm
図5 セラミック工具(C, F, H)および超硬工具(P10)で
S55C, Ca-Si脱酸鋼を切削した場合の工具寿命線図

具摩耗の進行状況を図示すると、図2および図3のようになる。これらの図からも、セラミック工具ではCa-Si脱酸鋼を切削した場合の方が各切削速度においてフランク摩耗およびクレータ摩耗が激しいことがわかる。

それぞれの工具に対する同様の摩耗進行図より、フランク摩耗幅 V_B が0.2 mmに達したときを寿命として各工具の寿命線図を描くと、図4および図5が得られる。

図4は普通鋼55-Nを切削した場合で、切削速度300~500 m/minの範囲ではセラミック工具はいずれも超硬工具P10より約5倍以上も寿命が長くなっている。ところが、図5に示されるCa-Si脱酸鋼切削の場合には上記とは全く逆で、セラミック工具は超硬工具P10に比べて半分以下の寿命である。図1の工具摩耗部の写真では、55-Ca切削時の工具に特別な欠け等は見られず、摩耗部には付着物が層状に生じているのみで、ごく通常の摩耗形態であった。したがって55-Ca切削時のセラミック工具の寿命がこのような短くなった原因は、この付着物と工具との間に何らかの反応が起こり、工具の耐摩耗性が低下したためであると考えられる。

これら工具面付着物の組成を調べるため、被削材55-Nあるいは55-Caを切削したセラミック工具の摩耗部をそれぞれEPMAにより線分析した。図6は分析結果の一例であるが、普通鋼55-Nを切削した工具の摩耗部には一面にFeが検出され、他の元素はほとんど付着していない。

これに対し、Ca-Si脱酸鋼を切削した工具では、切り

切削速度: 415 m/min, 切削時間: 20 min (55-N),
1 min (55-Ca), 切込み: 1.0 mm, 送り: 0.2 mm/rev

図6 S55C普通鋼およびCa-Si脱酸鋼を切削したセラミック工具Fのすくい面付着元素

くずと工具すくい面の接触域後半部にCa, Siなどが検出され、Feはごくわずかしき付着していない。これらCa, Si等の元素は被削材中に脱酸生成物として含まれている非金属系在物 CaO , SiO_2 が工具表面に選択的に付着したものであると考えられている^{5)~8)}。

また、これら酸化物は Al_2O_3 と反応して種々の低融点物質を作ることが知られている⁹⁾。 Al_2O_3 を主成分とするセラミック工具に、もしこのような低融点物質が生成されると、これによって工具表面が軟化し、工具の耐摩耗性が低下することは十分に考えられる。

そこで、このような反応が実際の工具に起こるかどうかを確かめるため、セラミック工具CおよびFの間にゲレナイト($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)あるいは $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ をはさみ、炉中で加圧加熱して反応試験を行った。

図7は $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ と反応させた場合の一例であるが、両工具間にはさんだ酸化物は溶融して薄い層になっている。図7(a)は研摩面であるが、工具Fには境界面近傍で変色が起こっており、元素の拡散が生じたことを示している。図7(b)は両工具の境界部分を拡大したもので、図に示す直線に沿ってCa, Si, AlおよびTiの濃度を分析した。なお試料には分析位置を知るためにダイヤモンドインデントによって圧痕をつけた。図7(c)に各元素の分析結果を示す。図においてAlの濃度が低下している部分が酸化物層である。図より、純アルミナ系のセラミックFではCaが境界面より約250 μm 程度奥深くまで拡散侵入しており、TiCを含むセラミックCでは約60 μm ほど侵入していることがわかる。また、SiもCaと同様に拡散しているが、工具への侵入距離はCaの場合ほど大きくはない。なお、工具からのTiの拡散流出は認められない。

このように、セラミック工具は CaO や SiO_2 などの酸化物と反応することが確認されたが、さらに図7(b)の圧痕の大きさを見ると、工具C側で境界面より約20 μm の位置にある圧痕Aはそれよりさらに内部にある圧痕Bよりも大きいことがわかる。これらの圧痕は同一荷重でつけたものであるから、これによって圧痕Aの領域すなわちCa, Siが拡散してきた部分は工具のマトリクスより硬度が低いことが証明される。

以上のことから、セラミック工具でCa-Si脱酸鋼を切削した場合には、被削材中の CaO , SiO_2 などの酸化物系介在物が工具表面にフィルム状に付着し、これらが工具と反応して工具を軟化させ、その耐摩耗性を損なうことが結論できる。

3.2 硫化物系介在物

鋼材中の硫化物がセラミック工具の摩耗に及ぼす影響を調べるため、S15Cイオウ快削鋼15-Sおよび普通鋼15-Nをセラミック工具Fで切削した。図8は両被削材に対する工具の損傷状況を示したものである。いずれの場合も工具には特異な損傷はなく正常な摩耗が生じているが、15-Sを切削した工具にはすくい面および逃げ面に多量の付着物が認められる。この付着物のために15-Sでは工具逃げ面摩耗幅の測定がほとんど不可能で、欠測値が多く工具摩耗の進行を時間的に追跡できなかった。しかし、例えば切削速度325 m/minにおいては15-Nを8 min間切削しただけで工具の横逃げ面平行部摩耗が $V_B=0.35 \text{ mm}$ も生じたのに対し、15-Sの場合には40 min間切削しても $V_B=0.08 \text{ mm}$ 程度しか摩耗しなかった(図8参照)。

またクレータ摩耗については図9に示すとおりで、

温度: 1450°C, 加熱時間: 60 min, 加圧力: 60 kg/cm²

図7 セラミック工具CおよびFとCaO-SiO₂との反応試験結果

切込み: 1.0 mm, 送り: 0.2 mm/rev, t: 切削時間, V: 切削速度
図8 セラミック工具FでS15C普通鋼およびイオウ快削鋼を切削した場合の工具摩耗形態

15-Nの場合には切削時間の経過と共にクレータ深さが増大しているが、15-Sでは最大クレータ深さが負となっている。これは付着物のためにすくい面が盛上がっている

ことを示すもので、この付着物を除去しても工具はほとんど摩耗していなかった。ただし切削速度が500 m/min以上の高速になると、付着物が局部的に溶融して切りくずと工具が直接接触するためにクレータ摩耗が生ずるようになる。

以上のことから、この場合生じた付着物層はセラミック工具の摩耗を強く抑制することがわかる。この付着物層の構成成分を調べるため、工具すくい面をEPMAで分析したところ図10が得られた。図よりクレータ部の付着物はMn, Sを主体とする層であることがわかる。また、クレータ部後方にはSiが付着しているが、これは切りくずと工具との接触域をはずれているため摩耗には直接影響しないものと考えられる。

4. 結 言

鋼材中の微量介在物がセラミック工具の摩耗に及ぼす影響について、切削実験および反応実験を行った結果、次のようなことが明らかとなった。

- (1) Ca-Si 脱酸鋼をセラミック工具で切削した場合の工具寿命は、普通鋼の場合に比べて短くなる。これ

切込み: 1.0 mm, 送り: 0.2 mm/rev,
工具形状: (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8)

図9 S15C普通鋼およびイオウ快削鋼をセラミック工具Fで切削した場合のクレータ摩耗進行状況

は超硬工具で切削した場合とは全く逆の傾向である。また、このときセラミック工具の摩耗面にはCa, Siが検出された。

- (2) 鋼材中に非金属介在物として含まれているCaOや SiO_2 はセラミック工具と反応し、CaあるいはSiがセラミック工具中へ拡散侵入して工具マトリクスを軟化させることがわかった。この反応はSiよりもCaの方が顕著で、工具への侵入距離はCaの方が大きかった。

- (3) イオウ快削鋼を切削したときに生じたMnS系の工具面付着物はセラミック工具の摩耗を防止する効果があり、工具の寿命を長くさせる働きがある。

おわりに、本実験を行うにあたり、有益な助言をいただいた広島大学片島三朗教授に謝意を表します。また、鋼材および工具をご提供下さった大同製鋼(株)、住友電工(株)、日本タングステン(株)、日本特殊陶業(株)および東芝タングロイ(株)に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 中山 登, 梶原 弘, 林 宏, 水草 新: セラミック工具の炭素鋼切削における $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ スピネルの生成, 名古屋工業技術試験所報告, 19, 6・7 (1970) 57.
- I. Ham & N. Narutaki: Wear Characteristics of Ceramic Tools, ASME, 95, 4 (1973) 951.
- 鳴瀧則彦: セラミック工具の研究I, 鋼切削時の工具摩耗, 広島大学工学部研究報告, 第21巻第2冊 (1973)

切削速度: 415 m/min, 切削時間: 4 min,
切込み: 1.0 mm, 送り: 0.2 mm/rev

図10 S15C普通鋼およびイオウ快削鋼を切削したセラミック工具Fのすくい面付着元素

127.

- 平尾政利, 佐田登志夫: 切削工具面の局部温度測定, 精密機械, 40, 2 (1974) 156.
- W. König: Der Einfluß nichtmetallischer Einschlüsse auf die zerspanbarkeit von unlegierten Baustählen, Ind. Anz., 87, 26, (1965) 443.
- 奥島啓式, 星 鉄太郎, 鳴瀧則彦: Ca脱炭鋼切削時の工具面付着物の挙動, 精密機械, 34, 7 (1968) 478.
- 奥島啓式, 鳴瀧則彦: Ca脱炭鋼切削時の工具面付着物の挙動 (第2報), 精密機械, 35, 6 (1969) 378.
- 精機学会切削性専門委員会: カルシウム脱炭鋼の被削性 (第4報), 精密機械, 37, 5 (1971) 331.
- 日本鉄鋼協会: 鉄鋼便覧 (1962) 1695.