窒化けい素系工具の切削性能および摩耗

(第1報)*

—— 鑄鉄切削時の摩耗 ——

山根八洲男** 顔 炳華*** 臼杵 年** 鳴瀧則彦**

Tool Wear and Cutting Performance of Silicon Nitride Ceramic Tool (1st Report)
—In the Case of Turning Cast Irons—

Yasuo YAMANE, Bing Hwa YAN, Hiroshi USUKI and Norihiko NARUTAKI

Due to its superior thermal and mechanical characteristics, a silicon nitride ceramics has been expected to be used for cutting tool materials. It has been reported that silicon nitride ceramic tools show good performance in machining cast iron, but large wear has been observed on the tools in machining carbon steel. In the case of cutting carbon steel, it has been assumed that the reaction between Si and Fe is the major cause of the large wear. If the assumption is correct, the reason must be clarified as to why the silicon nitride ceramic tool shows good wear resistance to the cast iron consisting of Fe. The purpose of this report is to thus clarify the tool wear and the cutting performance of silicon nitride ceramic tools in turning cast iron, and to study mechanisms having good wear resistance to the cast iron. Gray cast iron FC 25, continuous-casted iron FC 25-CC, ductile cast iron FC 25 D and carbon steel S 50 C were turned in the laboratory air, and in a sealed chamber in which the atmosphere was changeable. The results obtained were as follows: (1) The wear of the silicon nitride ceramic tool in turning FC 25-CC or FCD 25 was as large as that of turning S 50 C. (2) In the case of turning FC 25 in the laboratory air, the wear of the silicon nitride tool decreased with an increase in the cutting speed, and the protective layers consisting of Al-Mn oxide were observed on the rake face of the tool at high cutting speeds. (3) In the case of turning FC 25 in a low oxygen content atmosphere, the wear of the silicon nitride tool increased, and adhesion of the chips was observed on the rake face. On the contrary, in the case of turning FC 25-CC, no differences between the wear in the laboratory air and the wear in the low oxygen content atmosphere were observed.

Key words : silicon nitride ceramic tool, cutting performance, atmosphere, carbon steel, gray cast iron, continuous-casted iron, ductile cast iron

1. 緒 論

窒化けい素 (Si_3N_4) を主成分とするセラミックスは、他のセラミックスに比べ耐熱衝撃性及び破壊じん性が大きく、しかも高温においても硬さの低下が少ないという特徴を持つことから、切削工具材料として期待されている。しかしながら現在のところ、窒化けい素を主成分とする工具は、鑄鉄に対しては優れた耐摩耗性を示すと言われている¹⁾ものの、炭素鋼や一部の

合金鋼に対してはすくい面や逃げ面の摩耗が著しく発達することからその適用範囲が大きく制限されている。

窒化けい素系工具が鋼の切削において大きく摩耗する原因については、詳細は明らかにされていないが、工具主成分である Si が Fe と反応しやすいためであろうと推測²⁾されている。しかし、Si が Fe と反応する結果摩耗が進行するというメカニズムは、鉄系金属である鑄鉄に対し優れた耐摩耗性を示すという実験結果と一見矛盾しているように思われる。

本研究は、上記の観点から、窒化けい素系工具が鑄鉄に対し優れた耐摩耗性を示す理由、および同工具が鋼に対し大きな摩耗を示す原因、の2点を調査、解明

* 原稿受付 昭和62年3月18日、昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和61年3月29日)にて発表

** 正 会 員 広島大学工学部(東広島市西条町下見)

*** 学生会員 広島大学工学部(現、国立中央大学;台湾中壢市)

Table 1 Chemical compositions and hardness of tested works

Mark	Chemical compositions %									Hardness HB
	C	Si	Mn	P	S	Al	Mg	Ca	O(ppm)	
FC 25	3.35	2.08	0.58	0.140	0.097	0.011	tr.	tr.	71	168
FC 25-CC	3.28	2.59	0.37	0.091	0.013	0.001	0.003	tr.	27	174
FCD 25	3.44	2.15	0.41	0.016	0.014	0.013	0.023	0.001	15	140
S 50 C	0.50	0.22	0.68	0.024	0.016	0.018	tr.	tr.	9	200

することを目的とした。本報では主として窒化けい素系工具が鋳鉄に対し優れた耐摩耗性を示す理由について切削実験の結果から検討し、鋼に対する摩耗原因については次報で拡散実験の結果に基づいて述べる。

2. 実験条件および方法

2.1 被削材

表 1 に実験に使用した被削材の化学成分および硬さを示す。FC 25 はねずみ鋳鉄、FC 25-CC は連続鋳造鋳鉄、FCD 25 はダクタイル鋳鉄である。これら鋳鉄の化学成分の特徴を見ると、FC 25 は O_2 が 71 ppm、S も約 0.1% とほかに比べ高く、Al も 0.01% と比較的多い。一方 FC 25-CC は S、Al とともに低い、Mg を 0.003% 含んでいる。また FCD 25 は Al、Mg、Ca がほかに比べ多い、 O_2 は 15 ppm と非常に低い。

図 1 にこれら鋳鉄の光学顕微鏡による組織写真を示す。FC 25 はパーライト地のねずみ鋳鉄で、FC 25-CC は冷却速度が早い共晶黒鉛が樹枝状晶の間に非常に微細化して析出している。また FCD 25 はフェライト地が 80% 程度あり、高延性タイプのダクタイル鋳鉄となっている。

2.2 実験条件および方法

実験は主として市販の窒化けい素を主成分とした工具を用いて行った。なお、比較として超硬 K10、P10 種およびアルミナ系白セラミック工具も使用した。工具形状はすべて SNGN 120408 型で、工具取付角は (−5, −5, 5, 5, 15, 15, 0.8) である。切削実験は丸棒の

Fig. 2 Experimental setup for turning

乾式長手旋削としたが、大気中以外に窒素雰囲気下でも旋削を行った。

図 2 に窒素雰囲気下での実験に用いた装置を示す。被削材はチャック部および心押台側の一部を除いてカバーで覆われている。なお刃物台側の前面カバーはりん青銅板 (厚さ 0.15 mm) 製で送り方向に移動可能であり、工具ホルダが入るための四角の穴が開けられている。従って工具は切込み、送りの両方向に対し自由に移動できる。またカバー内には酸素濃度計のセンサーが取り付けられており、切削時の酸素濃度を監視することができる。

3. 実験結果

3.1 窒化けい素系工具による各種鋳鉄の切削

図 3 に窒化けい素系工具で各種鋳鉄を切削した場合の工具摩耗形態を示す。逃げ面については FC 25-CC および FCD 25 の切削では摩耗が非常に大きく発達するのに対し FC 25 の切削では前逃げ面境界部の摩耗が若干大きくなるものの、横逃げ面の摩耗は非常に小さいことがわかる。一方、すくい面についても FC 25-CC および FCD 25 の切削では大きな摩耗が発達しているのに対し、FC 25 切削ではこのような摩耗は見られず特に切削速度 300 m/min ではすくい面にはほとんど損傷は認められない。なお、FC 25-CC および FCD 25 では $V=100$ m/min ですくい面に多量の付着物が見られる。また切りくず接触長さは FCD 25 が最も長く、FC 25 と FC 25-CC は短くなっている。

図 4 に FC 25 を窒化けい素工具で 10

Fig. 1 Microstructures of tested cast irons

Fig. 3 Wear patterns of Si_3N_4 tools when turning cast irons
Depth of cut; 1 mm, Feed rate; 0.21 mm/rev

Fig. 4 Influence of cutting speed on tool wear when turning FC 25 with Si_3N_4 tool
Depth of cut; 1 mm, Feed rate; 0.21 mm/rev, Cutting time; 10 min

min 切削した場合の逃げ面最大摩耗幅 $VB_{\max}$ およびすくい面クレータ摩耗深さ KT を示す。図中斜線で示した3本は同一ロットであり、白ぬきで示したものはロットが異なる。なお本図以外の図はすべて白ぬきの材料を切削して得られたデータを用いている。図より、ロット間あるいは同一ロット内でも摩耗の絶対値

にはかなりの差が見られるが、 $VB_{\max}$ および KT のいずれも切削速度が高くなる程摩耗が小さくなる傾向はロットにかかわらず見られ（特に KT にはその傾向が顕著に認められる）、一般に見られる切削速度-工具摩耗の傾向とは全く逆の結果となっている。ところで FC 25 については、同一ロットでも被削材間で摩耗に差が見られたため、白ぬきで示したロットについては被削材が変わるごとに工具摩耗を確認し、同程度の摩耗を示す被削材から一連のデータを収集した。このため工具寿命に達するまでの切削は材料の量的制限から出来なかった。

図5および図6に他の铸铁および S 50 C を窒化けい素系工具で切削した場合の工具寿命線図を示す。図5は寿命基準 $VB_{\max}=0.2$ mm、図6は同じく $KT=20$ μm である。両図より明らかなように、これらの材料の切削では、FC 25 で見られたような、切削速度が高くなる程工具摩耗が小さくなる（寿命が長くなる）という傾向は見られない。

3.2 各種工具によるねずみ鉄の切削

上述のように、窒化けい素工具はねずみ鉄の切削において特異な挙動を示すが、この挙動が工具自身の特性によるものか、あるいは被削材の特性によるものかを明らかにするため、ねずみ鉄を超硬 K 10、P 10 およびアルミナ系白セラミック工具で旋削した。

図7および図8にねずみ鉄を各種工具で切削した場合の寿命線図（寿命基準 $VB_{\max}=0.2$ mm および $KT=20$ μm ）を示す。 $VB_{\max}$ 基準の図7について見れば、超硬 K 10、P 10 はほぼ同程度の寿命を示し、一方

Fig. 5 Tool life curves of Si_3N_4 tool in turning of FC 25-CC, FCD 25 and S 50 C
Depth of cut; 1 mm, Feed rate; 0.21 mm/rev

Fig. 8 Tool life curves of tested tools in turning of FC 25
Depth of cut 1 mm, Feed rate; 0.21 mm/rev

Fig. 6 Tool life curves of Si_3N_4 tool in turning of FC 25-CC, FCD 25 and S 50 C
Depth of cut; 1 mm, Feed rate; 0.21 mm/rev

Fig. 7 Tool life curves of tested tools in turning of FC 25
Depth of cut; 1 mm, Feed rate; 0.21 mm/rev

でも超硬工具はいずれも通常の寿命線図の傾きを示している。ただしこの FC 25 は被削材によっては、回数は少ないが、超硬 P 10 で窒化けい素系工具と同様切削速度が高くなる程すくい面摩耗が小さくなる現象が見られた（逃げ面摩耗は通常の傾向であった）。なお、 $VB_{\max}$ 基準では K 10, P 10 とほぼ同程度の寿命であるが、 KT 基準では P 10 の方が寿命が 2 倍程度長くなっている。またアルミナ系セラミック工具ではいずれの切削速度（ $V=100\sim400$ m/min）でもすくい面摩耗はほとんど見られなかった。

以上の結果から、切削速度が高くなるほど工具摩耗が小さくなる現象は窒化けい素系工具とねずみ鋳鉄との組合せにおいて特に顕著な現象であると言える。

ところで、適当な脱酸処理を行った鋼を P 系の超硬工具で切削した場合、工具摩耗面にベラークが生じ、ベラークの付着が見られない鋼種に比べすくい面摩耗が減少することが知られている。そこで窒化けい素系工具のすくい面摩耗部についてエネルギー分散型 X 線分析装置（EDX）により元素分析を行った。

図 9 は FC 25 および FC 25-CC を窒化けい素系工具で切削した場合の EDX による分析結果である。FC 25 の切削では切削速度 100 m/min あるいは 300 m/min のいずれにおいてもすくい面に Al, Mn の付着が見られ、特に Al については 300 m/min ですくい面全域に認められる。一方、FC 25-CC ではこれら Al, Mn は認められず、切削速度 100 m/min ではすくい面に多量の Fe が付着していることがわかる。ただし切削速度が 300 m/min になるとこの Fe はすくい面内にはほとんど認められず、すくい面後端の接触域外にはみ出した形となっている。

3.3 窒素雰囲気下での旋削

窒化けい素系工具はねずみ鋳鉄の切削において特異

アルミナ系セラミック工具はこれらに比べかなり長寿命を示している。しかしいずれの工具も窒化けい素系工具のような、切削速度が高くなる程工具摩耗が小さくなる傾向は見られない。また KT 基準の図 8 につい

Fig. 9 Distribution of elements at crater wear surface of Si_3N_4 tool when turning FC 25 and FC 25-CC

な現象を示しているが、同工具は刃先の雰囲気に対しても摩耗が大きく左右されることが判明している⁹⁾。すなわち、刃先雰囲気の酸素濃度を低下させながら普通炭素鋼 S 45 C を正面フライス切削した場合、すくい面摩耗は酸素濃度の低下につれ減少するが、0.1% O_2 を境にそれ以下の酸素濃度では逆に急増する現象を示す。従って窒化けい素系工具は表面がある程度酸化された状態で鉄に対する耐摩耗性が最も大きくなると言える。

ところでねずみ鋳鉄のようなき裂形切りくずが生じる被削材の切削では、すくい面に空气中的酸素が多少なりとも侵入する可能性は否定できない。もしねずみ鋳鉄の切削中に工具すくい面が酸化を受け、その結果耐摩耗性が向上しているのであれば、工具刃先に酸素が入り込まない状態で切削すれば工具摩耗は増大する可能性がある。そこで FC 25 および FC 25-CC について窒素雰囲気中で旋削を行った。

図 10 に FC 25 を窒素雰囲気中で旋削した場合の窒化けい素系工具の摩耗形態を示す。窒素雰囲気中の切削では特に低速域(100 m/min)で逃げ面摩耗が大きく発達し、しかも空気中と切削ではほとんど発生しなかったチッピングが切れ刃に生じていることがわかる。また、すくい面についても、大気中ではほとんど損傷の見られなかった高速切削(300 m/min)で、窒素雰囲気中では損傷が見られる。

図 11 および図 12 に窒素雰囲気中で FC 25 を旋削

した場合の窒化けい素系工具および超硬 P 10 種の寿命線図を示す。図 11 は寿命基準 $VB_{\max}=0.2 \text{ mm}$ 、図 12 は同じく $KT=20 \mu\text{m}$ である。逃げ面摩耗、すくい面摩耗とも同じ傾向を示し、いずれの工具も大気中より窒素ガス中での切削の方が寿命が短くなっているが、特に窒化けい素系工具ではその差が著しい。

なお FC 25-CC についても同様の実験を行ったが、逃げ面摩耗、すくい面摩耗とも雰囲気による差は見られなかった。

Fig. 10 Wear patterns of Si_3N_4 tools when turning FC 25 in nitrogen gas
Depth of cut; 1 mm, Feed rate; 0.21 mm/rev

Fig. 11 Influence of oxygen on flank wear when turning FC 25 with P 10 and Si_3N_4 tool
Depth of cut; 1 mm, Feed rate; 0.21 mm/rev

Fig. 12 Influence of oxygen on crater wear when turning FC 25 with P 10 and Si_3N_4 tool
Depth of cut; 1 mm, Feed rate; 0.21 mm/rev

4. 考 察

以上の実験結果をまとめると、窒化けい素系工具では、① 連続鋳造鋳鉄やダクタイル鋳鉄の切削では、炭素鋼の切削と同様すくい面および逃げ面に大きな摩耗

が生じる、② ねずみ鋳鉄の切削では、低速 (100 m/min) では上記の各被削材と同様比較的大きな摩耗が生じるが、切削速度が高くなると摩耗はかえって減少し、すくい面に Al, Mn などの付着物が見られる、③ 窒素雰囲気中の切削では、ねずみ鋳鉄では大気中の切削に比べ摩耗が非常に大きくなるが、連続鋳造鋳鉄では大気中と窒素雰囲気中で摩耗に大差は見られない、ことがわかった。以下各点について検討を行う。

① 連続鋳造鋳鉄やダクタイル鋳鉄を切削した場合の工具摩耗については、S 50 C の切削と同様にすくい面摩耗が非常に大きく発達することから、被削材との間に何らかの反応が生じていることが予想される。

図 13 は各鋳鉄および S 50 C を切削した窒化けい素系工具を 10% HCl で 1.5 h 超音波洗浄し、鉄系付着物を取り除いた後のすくい面の SEM 写真である。なおこれらの面は洗浄後 EDX により付着物の分析を行ったが、FC 25 の切削を除き (FC 25 では図 9 とほぼ同様の結果となった) 工具成分以外は全く検出されなかった。写真より各被削材によりすくい面の状況が全く異なり、FC 25 では膜状の付着物 (EDX の分析から Al_2O_3 が主成分の酸化膜と考えられる) が見られるのに対し、連続鋳造鋳鉄ではすくい面はエッチビット状の小さなくぼみ (恐らく結晶粒界部に発生していると考えられる) が見られるものの、全体的に非常に滑らかである。また FCD 25 および S 50 C ではガラス状に塑性変形したすくい面となっているが、特に S 50 C の切削では過大な塑性変形を受けて流されたような溝状の凹凸面となっている。従って FC 25-CC, FC 25 および S 50 C ではそれぞれ摩耗機構が異なるものと考えられるが、それぞれどのような機構で摩耗が生じているのかは現在のところ不明である。ただし滑らかな面にせよ、ガラス状の面にせよ、単に切りくずの機械的な擦過で生じたものとは考え難く、切りくずとの反

Fig. 13 SEM micrograph of the Si_3N_4 tools cleaning in 10% HCl ultrasonic bath
Cutting speed; 300 m/min, Depth of cut; 1 mm, Feed rate; 0.21 mm/rev, Cutting time; 1 min

応が介在している可能性は十分に考えられる。なおこれについては次報で検討したい。

② ねずみ鋳鉄を切削した場合の窒化けい素系工具の特異な摩耗挙動（切削速度が高くなるほど工具摩耗が減少している）については、図9に示したすくい面摩耗部の分析結果あるいは図13のすくい面の拡大写真から、以下のように考えることができる。

窒化けい素系工具は高温下ではFeと反応しやすいため、通常、鉄系金属を高速で切削すると工具摩耗は非常に大きくなる。しかし工具と切りくず（あるいは被削材）との間に酸化物が安定した膜として付着した場合、工具とFeとの直接接触が妨げられることから、反応による摩耗は減少すると考えられる。

なお超硬工具に対するベラークの生成・付着については、(1) 被削材中に保護膜となる非金属介在物を含む、(2) 被削材中の酸素濃度がある程度高い、(3) 工具中にベラークと反応する成分を含む、ことが必要条件としてあげられるが⁴⁾、これらの条件は窒化けい素系工具に対する酸化膜の付着に対しても適応されると考えられる。

ところで本実験に使用したねずみ鋳鉄は、(1) Si, Mn, Al, Sを適当量含み、(2) 酸素濃度も71 ppmと高く、また工具も(3) Si_3N_4 が主成分であり高温下では酸化されやすい⁵⁾ことから、酸化物と反応しやすいと考えられる。従って本実験条件は上記の酸化膜の付着条件を満足しており、鋳鉄の切削ではあるが、高速切削で酸化膜が安定に付着し摩耗が減少したものと推測される。

③ ねずみ鋳鉄の窒素雰囲気中での切削で、大気中に比べ摩耗が大きく発達した点については、実験結果のところでも説明しているが、以下のように考えられる。
②でも述べたように窒化けい素系工具では切りくずとの接触面に酸化膜が付着すると耐摩耗性が向上すると考えられる。ところで、窒化けい素系工具は工具自身が酸化物を非常に造りやすいことから、切削中であってもある程度温度が高く、しかも酸素の供給がある場合は工具表面自体が酸化膜となる可能性がある。
②では酸化膜となる酸化物は被削材側から供給されることを想定しているが、工具自身が酸化膜を形成した場合でも（切りくずと接触するのは酸化膜とは言え工具自身であることから、外部から酸化膜が供給され

る場合とは耐アブレシブ性の点で劣るとは思えるが）Feと窒化けい素との直接接触はある程度減少することから、このように酸化膜が生じない場合に比べ耐摩耗性は向上すると考えられる。

なお、実験事実からすれば、ねずみ鋳鉄のような不連続型切りくずを生成する被削材の切削では、工具すくい面あるいは逃げ面に空気が侵入している可能性があると言える。

5. 結 論

窒化けい素系工具が鋳鉄に対し優れた耐摩耗性を示す原因を調べるため、組成の異なる数種類の鋳鉄を大気中および窒素雰囲気中で旋削した。その結果窒化けい素系工具では、

- (1) 連続鋳造鋳鉄やダクタイル鋳鉄を切削した場合は、炭素鋼の切削と同様すくい面および逃げ面に大きな摩耗が生じる。
- (2) ねずみ鋳鉄を切削した場合は、低速では上記の各被削材と同様比較的大きな摩耗が生じるが、切削速度が高くなると摩耗はかえって減少し、すくい面にAl, Mnなどの付着物が見られる。
- (3) 窒素雰囲気中で切削した場合は、ねずみ鋳鉄では大気中での切削に比べ摩耗が非常に大きくなるが、連続鋳造鋳鉄は大気中と窒素雰囲気中で摩耗に大差は見られない。

ことがわかった。これらの結果から窒化けい素系工具によるねずみ鋳鉄の切削では、酸化物系付着物による摩耗面の保護作用と、大気中の酸素による酸化が工具摩耗を減少させている可能性があることを示した。

参 考 文 献

- 1) M. Fukuhara, K. Fukuzawa and A. Fukawa: Physical Properties and Cutting Performance of Silicon Nitride Ceramic, *Wear*, 102, (1985) 195.
- 2) 鈴木 寿: セラミック工具の現状と将来動向, *セラミックス*, 19, 7 (1984) 549.
- 3) 鳴瀧則彦, 山根八洲男, 臼杵 年, 倉橋 直: 窒化けい素系工具の切削性能及び摩耗特性, 昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1986) 615.
- 4) 山根八洲男, 顔 炳華, 臼杵 年, 鳴瀧則彦: 高速切削における硫黄快削鋼の被削性 (第2報), *精密工学会誌*, 53, 11 (1987) 1779.
- 5) 林 安茂, 今井吉彦: 窒化けい素粉末と窒化けい素セラミックス, *金属*, 7 (1986) 33.