オーステンパ処理球状黒鉛鋳鉄の切削における工具摩耗*

和 田 任 弘^{*1}, 藤 原 順 介^{*2}
花 崎 伸 作^{*2}, 安 富 雅 典^{*3}

Tool Wear in Cutting of ADI

Tadahiro WADA, Junsuke FUJIWARA,
Shinsaku HANASAKI and Masanori YASUTOMI

As austempered ductile iron (ADI) has high tensile strength and high hardness, it is expected to be widely used in the future. However, the tool wear in ADI becomes larger than that in the gray cast iron and the tool reaches the tool life in a few minutes in the turning with a cemented carbide tool. In this study, in order to find out the effective tool material for the turning of ADI, three kinds of the coated cemented carbide tools and two kinds of the ceramics tools were used. The tool wear in turning of ADI was experimentally investigated under the cutting conditions of the cutting speed of 0.5 to 6.67 m/s, the feed rate of 0.2, 0.4 mm/rev and the depth of cut of 1.0 mm. The main results obtained are as follows: (1) The Ti(CN)-Al₂O₃-TiN coated tool had the slowest wear progress among three coated tools. (2) The Al₂O₃ ceramics tool had the similar tool wear progress to the Ti(CN)-Al₂O₃-TiN coated tool. (3) In the turning of ADI with the Al₂O₃ ceramics tool and the Si₃N₄ ceramics tool (at the low cutting speed), the abrasive wear was observed on the flank. (4) In the case of high feed rate 0.4 mm/rev, the tool wear of the Si₃N₄ ceramics tool did not increase rapidly. On the contrary, the Al₂O₃ ceramics tool tended to be broken easily and the coated layers of the coated tools were easily exposed.

Key Words: Cutting, Turning, Cutting Tool, Tool Life, Tool Wear, Austempered Ductile Iron, Coated Cemented Carbide Tool, Ceramics Tool

1. 緒 言

オーステンパ処理された球状黒鉛鋳鉄(Austempered Ductile Iron, 以後 ADI と呼ぶ)は, 高強度・高硬度であるため, 機械部品としての利用が期待されている。しかし, 超硬合金工具による旋削(切削速度 1.67 m/s)では, 工具寿命時間が数分程度しかなく, 切削がかなり困難な材料である⁽¹⁾。この ADI の切削には, 硬質材料の仕上げ切削に効果がある CBN 工具やセラミックス工具が適した工具材種と考えられるが, それについては次のような報告がある。新谷ら⁽²⁾は, 結合材の異なる CBN 工具を用い, 仕上げ切削における最適条件と工具材種の選定を行い, さらに CBN 工具の摩耗機構について考察を加えている。また, 加藤ら⁽³⁾は, 配合要素の異なる CBN 工具で ADI の仕上げ切削を行い, 工具の配合成分や c-BN 粒径が工具摩耗および仕上げ面粗さに及ぼす影響を検討し最適加工条件の検討を試みている。これらいずれの研究も, 仕上げ

切削における CBN 工具の有効性を示しているが, 送りや切込みが大きい場合に対する有効性は明らかでない。ねずみ鋳鉄の高送り切削には, セラミックス工具が一般に使用されており, 鳴瀧⁽⁴⁾も, ねずみ鋳鉄の切削にはセラミックス工具が適していることを示している。また, 高じん性の超硬合金を母材として, 耐摩耗性に優れたセラミックスをコーティングしたコーテッド超硬工具も, ADI の高送り切削に有効な工具と考えられる。木曾ら⁽⁵⁾は, 超硬合金, サーメット, コーテッド超硬合金, セラミックスの工具材種で ADI の旋削を行い, 工具材種が工具摩耗に及ぼす影響について調べている。高能率加工を実現するためには, 高速度・高送り切削は有効な手段であるが, ADI を高速切削したときの摩耗機構については, 明らかにされていない。

そこで本研究では, ADI の高速度・高送り切削時に適した工具材種を明らかにするために, 市販されているコーテッド超硬工具およびセラミックス工具の摩耗特性を調べ, それらの特性を比較検討した。さらに, 各工具の摩耗面の SEM 観察を行い, 摩耗機構について考察を加えた。

* 原稿受付 1998 年 3 月 19 日。

^{*1} 正員, 奈良工業高等専門学校(〒639-1080 大和郡山市矢田町 22)。^{*2} 正員, 大阪大学大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)。^{*3} 正員, 大阪電気通信大学(〒572-8530 寝屋川市初町 18-8)。

2. 実験方法

実験に用いた ADI の化学成分、機械的性質および熱処理の条件を表 1 に示す。この被削材 ADI の引張り強さは 1.1 GPa、硬度は HB 327 である。

使用した工作機械は、無段変速装置を取付けた昌運工作所製 ST 5×1000 型高速精密旋盤(7.5/11 kW, 8~2 500 rpm)である。使用バイトは、市販の TNGA 160408 型スローアウェイチップを、MTG NR 2525 M 16 型外径加工用バイトホルダ(東芝タンガロイ)に取付けたもので、このときの工具形状は(−6°, −6°, 6°, 6°, 30°, 0°, 0.8)となる。使用工具材種を、表 2 に示す。コーテッド(a)は、超硬合金 P 20 種を母材に、TiC-Al₂O₃-TiN を被覆したものである。コーテッド(b)は、超硬合金 P 10 種を母材に、Ti(CN)-Al₂O₃-TiN を被覆したものである。コーテッド(c)は、超硬合金 K 10 種を母材に、TiN を単層被覆したものである。これらのコーテッド工具の被膜の厚さは、順に薄くなっている。また、Al₂O₃ セラミックスには TiN が被覆してあり、Si₃N₄ セラミックスには TiN-Al₂O₃-TiN が被覆してある。コーティング方法は、TiN 単層コーティングだけは PVD によるもので、ほかはいずれも CVD によるものである。また、

Table 1 Chemical compositions, mechanical properties and heat treatment conditions of ADI

Chemical compositions (wt %)									
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Fe
3.69	2.38	0.47	0.01	0.01	0.81	0.02	0.03	0.14	Bal.
Mechanical properties									
Tensile strength					1.1GPa				
Brinell hardness					HB327				
Heat treatment conditions									
Austenitizing temperature					1173K (Holding time 2h)				
Salt bath temperature					648K (Holding time 1h)				

Table 2 Tool materials

Cutting tool	Substrate	Coating layer Materials	Thickness (μm)
Coated (a)	P20	TiC-Al ₂ O ₃ -TiN	12
Coated (b)	P10	Ti(CN)-Al ₂ O ₃ -TiN	8
Coated (c)	K10	TiN*	3~4
Al ₂ O ₃ ceramics		TiN*	1
Si ₃ N ₄ ceramics		TiN-Al ₂ O ₃ -TiN	3~4

*: PVD process and single coating layer
Others: CVD process and multiple coating layers

Table 3 Cutting conditions

Cutting speed	V= 0.5 ~ 6.67m/s
Feed rate	S= 0.2, 0.4mm/rev
Depth of cut	a= 1.0mm
Cutting method	Dry

比較のために、超硬合金 P 10 種も用いた。なお、2 種類のセラミックスの工具切れ刃には、0.15 mm×(−25°)のチャンファホーニングが施してある。

表 3 に示す切削条件で、ADI の外丸削りを行い、工具摩耗などを調べた。また、摩耗面の SEM 観察も行った。

3. 実験結果および考察

3.1 各種工具材の工具摩耗 図 1 に、切削速度 1.67 m/s、送り 0.2 mm/rev、切込み 1.0 mm で切削した場合の 2 種類のコーテッド工具の摩耗状態を示す。図 1(a)に示すコーテッド工具(a)と、ここでは示していないが、コーテッド工具(b)の摩耗状態はよく似ており、すくい面が少しへこんだ状態となる。また、切込み境界部付近のすくい面には、コーティング層の剥離がみられた。図 1(b)に示すコーテッド工具(c)と、ここでは示していないが超硬合金 P 10 種工具の摩耗状態はよく似ており、すくい面にはクレータが生じている。しかし、図 1 に示したコーテッド工具(a)、(c)の場合も、また後述する 2 種類のセラミックス工具も、逃げ面摩耗が主な工具損傷であった。

図 2 に、切削速度 1.67 m/s における切削距離と逃げ面摩耗幅の最大値 VB_{max} の関係を示す。超硬合金

(a) Coated (a) ($L=540$ m) (b) Coated (c) ($L=370$ m)

Fig. 1 Tool wear

($V=1.67$ m/s, $S=0.2$ mm/rev, $a=1.0$ mm, Dry)

Fig. 2 Relation between width of flank wear and cutting distance ($V=1.67$ m/s)

P 10 種工具の場合、切削距離の増加につれ摩耗幅は急増している。これに対し、3 種のコーテッド工具の摩耗進行は超硬合金 P 10 種工具に比べ遅く、コーティング層の耐摩耗性の効果が現れている。この 3 種のコーテッド工具の中では、TiN 単層被覆のコーテッド工具(c)の摩耗進行がやや速い。これは、コーテッド工具(c)に使われている TiN 被覆の硬度(HV 1950)が、 Al_2O_3 の硬度(HV 3000)⁽⁶⁾に比べ低いため、摩耗進行が速くなると思われる。また、コーテッド工具(b)と Al_2O_3 セラミックス工具の摩耗進行はよく似ており、摩耗進行は最も遅い。

次に、切削速度を 2.5, 3.33 m/s に上昇させた結果を、図 3 に示す。なお、コーテッド工具(a), (c)では、切削速度を 3.33 m/s にすると摩耗が急増したので切削速度 2.5 m/s の場合のみ示す。3 種のコーテッド工具を用い切削速度 2.5 m/s で切削した場合、いずれのコーテッド工具も図 2 に示した切削速度 1.67 m/s の場合に比べ摩耗進行は速くなる。特に、コーテッド工具(a), (c)の摩耗進行は速い。しかし、コーテッド工具(b)の摩耗進行は、コーテッド工具(a), (c)に比べかなり遅い。また、コーテッド工具(b)の場合、切削速度を 3.33 m/s, 6.67 m/s と大きくしても、それぞれ切削距離 250 m, 100 m 付近まではコーティング層が母材に残っていて切削可能であった。しかし、その後の摩耗進行は急速になる。このことから、コーテッド工具(b)は、被膜の密着性に優れていることがうかがえる。

次に、切削速度 2.5 m/s 以下では、コーティング層の厚いコーテッド工具(a)の摩耗進行は、コーティング層の薄いコーテッド工具(b)に比べ速い。これは、次の理由によるものと考えられる。すなわち、コーティング層を厚くすると母材とコーティング層との密着強度が低下し、コーティング層が母材から剥がれやすくなる。また、コーティング層を厚くすることによ

て、コーティング層表面に微小なき裂が存在し、き裂の応力集中により母材の強度の低下をおこし⁽⁷⁾やすい。これらの理由のために、コーティング層の厚いコーテッド工具(a)のほうが摩耗進行が速くなると考えられる。

図 4 に、送り 0.2 mm/rev, 切込み 1.0 mm で切削した場合の寿命線図を示す。工具寿命の判定基準は、 $VB_{max}=0.2$ mm(Al_2O_3 セラミックス工具の場合、 $VB_{max}=0.15$ mm)とした。コーテッド工具(a), (c)の V-T 線図は、傾きが超硬合金 P 10 種工具の傾きとほぼ等しく、長時間側に移動させたものとなっている。これに対し、コーテッド工具(b)の V-T 線図は、切削速度 150 m/min 以下では Al_2O_3 セラミックス工具とほぼ等しいが、高速になると、傾きが超硬合金 P 10 種工具の傾きとほぼ等しくなり、寿命時間は急激に短くなる。 Al_2O_3 セラミックス工具は、高速切削で寿命が長い。2 種類のセラミックス工具は、3 種のコーテッド工具に比べ高速でも使用可能であることがわかった。

3・2 セラミックス工具の摩耗形態 3・1 節の結果より、ADI の高速切削には、2 種類のセラミックス工具が適しているが、 Al_2O_3 セラミックス工具のほうが、 Si_3N_4 セラミックス工具に比べ長時間の切削が可能である。この理由について次に述べる。一般に、ADI を切削した場合、ADI 中の残留オーステナイトがマルテンサイトに加工誘起変態し加工硬化するため、著しく被削性が悪くなるとされている⁽⁸⁾。そこで、ADI の切削により生じた、加工硬化の程度について調べた。図 5 は、工具摩耗が比較的少ない工具を用いて切削した場合に、切削仕上げ面からの深さとビッカース硬さの関係を調べたものである。使用工具は、 Al_2O_3 セラミックス工具である。切削速度 6.67 m/s では、切削仕上げ面に近づくにつれ硬度は上昇しており、加工硬化の様相がうかがえるが、硬度上昇はごくわずかである。他の切削速度では、硬さはほとんど変

Fig. 3 Relation between width of flank wear and cutting distance ($V=2.5, 3.33$ m/s)

Fig. 4 Tool life

Fig.5 Relation between Vickers hardness and depth from machined surface

化しない。このことから、本実験で使用した切削条件の範囲では、顕著な加工硬化は生じていないことがわかる。そこで、本実験で使用した Al_2O_3 セラミックス工具と Si_3N_4 セラミックス工具の機械的、熱的性質を調べた結果を表4に示す。これらの特性値はカタログ⁽⁹⁾より引用したものである。表4に示すように、常温における硬度はいずれのセラミックス工具であっても大差ないが、高温硬度は Al_2O_3 セラミックスのほうが低い。また、 Al_2O_3 セラミックスの熱伝導率は、 Si_3N_4 セラミックスの熱伝導率に比べ約半分程度小さい。これらのことから、2種類のセラミックス工具を比較すると、 Al_2O_3 セラミックス工具のほうが、熱伝導率が小さく、しかも高温硬度も低いので工具寿命が短くなると考えられる。しかし、上述のように切削実験では Al_2O_3 セラミックス工具のほうが工具寿命時間が長い。このことから、表4に示すカタログによる特性値以外の要因の存在が考えられる。

図6に、切削速度を1.67 m/sから6.67 m/sまで変化させて、ADIを切削した場合に得られた切りくずを示す。 Al_2O_3 セラミックス工具の場合、いずれの切削速度でも不連続形の切りくずである。これに対し Si_3N_4 セラミックス工具の場合、切削速度1.67 m/sでは、切りくずは鋸歯状切りくずになる。切削速度が低い1.67 m/sの場合には、切りくずの色から判断して、 Si_3N_4 セラミックス工具の切削部の温度は、 Al_2O_3 セラミックスに比べ低くなっていると推察できる。しかし、切削速度を6.67 m/sに大きくすると、切りくずは不連続形となり、切りくずの色から判断すると Si_3N_4 セラミックス工具の切削温度もかなり高温になっていると推察できる。さらに、2種のセラミックス工具について、摩耗形態を調べるために工具摩耗面のSEM観察を行った。図7に、 Al_2O_3 セラミック

Table 4 Mechanical and thermal properties of two ceramics tools⁽⁹⁾

Ceramics tool	Hardness		Thermal conductivity W/(m · K)	Thermal expansion coefficient 10 ⁻⁶ /K
	H _R A 298K	Hv 1273K		
Al_2O_3 Ceramics	94.0	670	25.5	7.4
Si_3N_4 Ceramics	93.2	1250	58.6	3.6

Fig.6 Configuration of chips

Fig.7 SEM observation of tool wear (Al_2O_3 ceramics)

ス工具の場合を示す。図7(i)(a)に示すように、切削速度1.67 m/sで切削した場合、すくい面摩耗は、切れ刃にほぼ平行に、しかも切れ刃近傍から深く摩耗しており、切りくずと工具との接触長さが短いことがうかがえる。また、すくい面および逃げ面には凝着物は見られない。図7(i)(a)のA部の切込み境界部付近の逃げ面には、図7(i)(b)に示すようにアプレシブ摩耗が全面にわたって生じており、また凝着物もほとんど見られない。図7(ii)に示す切削速度6.67 m/sの場合も同様なアプレシブ摩耗が観察される。このことから、 Al_2O_3 セラミックス工具のおもな摩耗形態は、いずれの切削速度でもアプレシブ摩耗と考えられる。図8に、 Si_3N_4 セラミックス工具の場合を示す。図8(i)に切削速度1.67 m/s、図8(ii)に6.67 m/sの場合を示す。いずれの切削速度も、図7に示した Al_2O_3 セラミックス工具の摩耗面と異なっている。すなわち、 Si_3N_4 セラミックス工具の場合、切れ刃近傍が大きく摩耗しているが、切れ刃から離れるにつれ摩耗深さは小さくなっており、切りくずと工具との接触長さが Al_2O_3 セラミックス工具の場合に比べ長いことがうかがえる。切削速度1.67 m/sの場合、図8(i)(a)に示すようにすくい面には、わずかであるが凝着物が見られる。また、A部の切込み境界部付近の逃げ面には、図8(i)(b)に示すようにアプレシブ

摩耗が生じている。これに対し、切削速度6.67 m/sの場合、図8(ii)(a)に示すようにすくい面にかなり大きな凝着物が見られる。また、A部の切込み境界部付近の逃げ面には、図8(ii)(b)に示すように顕著なアプレシブ摩耗は見られない。このことから、 Si_3N_4 セラミックス工具では、切削速度が小さい場合、切削温度が高くならず切りくずは軟化しにくくなり、アプレシブ摩耗がおもな摩耗形態になる。これに対し、切削速度が大きくなると切削温度が上昇し、母材と被削材との凝着が起こりやすくなり、摩耗が大きくなると考えられる。

3.3 送りが工具摩耗に及ぼす影響 3.2節の結果より、切削速度1.67 m/s、送り0.2 mm/revで

(a) Tool wear (b) Detail of A
(i) $V=1.67$ m/s, $L=1010$ m

(a) Tool wear (b) Detail of A
(ii) $V=6.67$ m/s, $L=850$ m

Fig. 8 SEM observation of tool wear (Si_3N_4 ceramics)

(a) Tool wear (b) Detail of A
(i) Coated (a), $L=526$ m

(a) Tool wear (b) Detail of A
(ii) Coated (b), $L=552$ m

(a) Tool wear (b) Detail of A
(iii) Si_3N_4 ceramics, $L=300$ m

Fig. 9 SEM observation of tool wear
($V=1.67$ m/s, $S=0.4$ mm/rev, $a=1.0$ mm)

Fig. 10 Relation between width of flank wear and cutting distance ($V=1, 1.67$ m/s)

ADI を切削した場合、2 種類のセラミックス工具とコーテッド工具 (a), (b) が ADI の切削に使用可能であることがわかった。そこで次に、これらの工具を用い、切削速度 1.67 m/s で、送りを 0.4 mm/rev に大きくして ADI の切削を行った。その結果、 Al_2O_3 セラミックス工具は、3 回同一実験を繰返したが、いずれの場合も切削距離約 40 m で破損を生じた。また、超硬合金 P10 種工具とコーテッド工具 (c) の摩耗進行は急速になった。図 9 に、コーテッド工具 (a), (b) および Si_3N_4 セラミックス工具の摩耗状態を示す。図 9(i)(a), (ii)(a), および(iii)(a)にそれぞれ示すように、コーテッド工具 (a), (b) および Si_3N_4 セラミックス工具ではいずれの工具も、コーナ部のすくい面が少しへこんだ摩耗形態をしているが、逃げ面摩耗がおもな工具損傷となっている。図 9(i) に示すコーテッド工具 (a) の場合、図 9(i)(b) に示すようにコーティング層にはアブレシブ摩耗が観察される。図 9(ii) に示すコーテッド工具 (b) の場合にも、図 9(ii)(b) に示すようにコーティング層にはアブレシブ摩耗が観察される。図 9(iii) に示す Si_3N_4 セラミックス工具の場合も、図 9(iii)(b) に示すようにコーティング層にはアブレシブ摩耗が観察される。以上のことから、いずれの工具も切削速度 1.67 m/s におけるおもな摩耗形態は、アブレシブ摩耗であることがわかる。

図 10 に、切削距離が逃げ面摩耗幅に及ぼす影響を示す。いずれのコーテッド工具であっても、摩耗幅が 0.2 mm 付近を越えると摩耗は急増する。これは、送り 0.2 mm/rev の場合と同様、コーティング層が摩滅し母材が露出すると、母材で切削が行われるため摩耗が急増したものと考えられる。これに対し、 Si_3N_4 セラミックス工具の摩耗進行は、コーテッド工具に比べかなり遅く、また急激な摩耗増もみられない。このことから、ADI の高速送り切削には、 Si_3N_4 セラミックス工具が有効であることがわかる。そこで、 Si_3N_4 セラ

(a) $V=3.33$ m/s ($L=535$ m) (b) $V=5.0$ m/s ($L=546$ m)

Fig. 11 Tool wear

(Si_3N_4 ceramics, $S=0.4$ mm/rev, $a=1.0$ mm, Dry)

ミックス工具で、切削速度 $3.33, 5.0$ m/s と大きくして ADI の切削を行った。図 11 に、このときの摩耗状態を示す。いずれの切削速度でも、切削速度 1.67 m/s の場合と同様、コーナ部のすくい面が少しへこんだ形状をしているが、逃げ面摩耗はそれほど急増しない。このことから、 Si_3N_4 セラミックス工具は、ADI の高速・高送り切削が可能であることがわかる。

5. 結 言

本研究では、ADI をコーテッド工具およびセラミックス工具で切削し、そのときの工具摩耗を詳細に調べた。得られたおもな結果は次のとおりである。

- (1) コーテッド工具の中では、 $\text{Ti}(\text{CN})\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$ コーテッド工具の摩耗進行が最も遅かった。
- (2) Al_2O_3 セラミックス工具の摩耗進行も、 $\text{Ti}(\text{CN})\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$ コーテッド工具と同程度に遅かった。
- (3) Al_2O_3 セラミックス工具、および低速切削時の Si_3N_4 セラミックス工具の逃げ面には、アブレシブ摩耗が観察された。

- (4) 送りを 0.4 mm/rev と大きくした場合、切削距離が増加しても、 Si_3N_4 セラミックス工具の工具摩耗は急増しない。これに対し、 Al_2O_3 セラミックス工具は破損しやすく、またコーテッド工具では、コーティング層が摩滅し母材が露出すると、工具摩耗は急増する。

最後に、被削材 ADI を提供して頂きましたダイハツ工業株式会社および切削工具を提供して頂きました東芝タンガロイ株式会社にお礼申し上げます。

文 献

- (1) 上野拓・ほか 3 名, 機論, **54**-503, C(1988-7), 1520.
- (2) 新谷 博・ほか 3 名, 精密工学会誌, **56**-12(1990), 2261.

- (3) 加藤秀治・ほか2名, 機論, **57**-541, C(1991-9), 3027.
 - (4) 鳴瀧則彦, 機論, **58**-543, C(1992-3), 675.
 - (5) 木曾弘隆・ほか2名, 鑄物, **61**-9(1989), 615.
 - (6) 鈴木寿, 超硬合金と焼結硬質材料—基礎と応用—, (1986), 206, 丸善.
 - (7) 文献(6)の215ページ.
 - (8) 滝田光晴・ほか4名, 鑄物, **61**-9(1989), 620.
 - (9) '93 東芝タンガロイ切削工具カタログ, (1993), 597, 東芝タンガロイ株式会社.
-