

高炭素クロム鋼の切削加工におよぼす炭化物分布の影響

井上 孝司*・細井 祐三*・中島 浩衛*・竹中 宏行*²・羽生田 智紀*³

Influence of Cementite Particle Size Distribution on Machinability
and Tool Life of High Carbon Cr-bearing Steels

Takashi INOUE, Yuzo HOSOI, Koe NAKAJIMA, Hiroyuki TAKENAKA and Tomonori HANYUDA

Synopsis : A study has been made on the relation between the distribution of cementite (Fe_3C) and the wear of tool in high carbon chromium bearing steels. Two kinds of materials with different state of cementite were prepared by utilizing the thermo-calc program. The particle size and content of cementite in these materials were controlled by heat-treatment. In the first stage, machinability was estimated by using the materials of three kinds with a different particle diameter of cementite. In the second of the experiment, the influence of interparticle distance of cementite on the tool life was evaluated using the cutting tool of TiC and SiC. The amounts of tool wear were increased with increasing particle size and the areal ratio of cemented carbide. The amounts of tool wear were also increased as the interparticle distance became short. The tool life of TiC tool was longer than that of SiC tool in cutting the same chemical composition of materials. Surface roughness (R_{max}) of the material was influenced by the particle diameter and interparticle distance of cementite. An experimental equation was proposed to estimate the tool life from interparticle distance of the precipitated particle.

Key words : machinability ; cutting ; cementite ; hard steel ; heat treatment ; grain size ; interparticle spacing.

1. 緒言

機械部品として重要となる摺動部や回転部分では、機械加工を施され高硬度に調質された軸受鋼が多用されている。このような高硬度(Rc60以上)で比較的靱性の低い材料は機械加工する場合¹⁾、極端に短くなる工具寿命や加工中の切り刃に発生するチップング、またそれに伴う仕上げ面あらさの不安定性などがあり、加工上多くの問題を持つ難削材料^{2,3)}とされてきた。近年、CBNを始めとして、セラミックスやサーメットなど、各種の優れた切削工具⁴⁾の開発と実用化により金型鋼、軸受鋼などの高硬度材についても経済的な切削加工⁵⁾が可能となってきてはいるが、依然として多くの問題がある。また構造用低炭素鋼のCrと被削性⁶⁾の関係についての報告はあるが、高硬度に処理された軸受鋼を最近の高硬度用切削工具を使い、材料の組成成分と析出炭化物との関係から被削性を検討した報告はあまりない。

本研究では、1)炭化物性状と被削性の関係、2)粒子間距離と工具摩耗の関係、の2因子に注目し、高炭素クロム軸受鋼(SUJ-2)の化学成分を基本として、熱処理により析出する炭化物のC, Crをコントロールした供試材を目的別に2グループ作製し、この高硬度粒子が介在する材料に対して2種類の切削工具を使い検討を行ったのでその結果を報

告する。

2. 供試材

2・1 化学成分と炭化物制御

高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)の化学成分を基本に状態図計算ソフトウェアThermo-Calcによって、焼き入れ温度における熱平衡計算を行い、析出炭化物(M_3C)がそれぞれFig.1, Fig.2で示す対応線に沿った状態となるようにマトリックスの化学成分を、それぞれTable1のごとく設定した。真空高周波誘導炉によりそれぞれ50kgと150kgの鋼塊を溶解した。各インゴットは分塊圧延後、熱間鍛造により素形材とし熱処理で目的とする析出炭化物を制御した。組織と炭化物性状それに係わる被削性を検討する対象材料として、硬さ、炭化物の粒径、面積率、含有量が異なる3種類(これをCRa, CRb, CRcとし以下この相番を使用する)を作製しこれを供試材Iとした。供試材IIは、析出炭化物の粒子間隔と工具摩耗の関係を解明すべき材料として、母相の硬さを一定にし、マトリックス成分を変えないでCとCrのみを変化させ炭化物の粒子間距離の異なる4種類(これをCR2, CR3, CR4, CR5, とする)を作製した。比較対象材料として炭化物が全く析出していない完全固溶相からなる1種

平成9年10月13日受付 平成9年12月15日受理 (Received on Oct. 13, 1997; Accepted on Dec. 15, 1997)

* 大同工業大学 (Daido Institute of Technology, 2-21 daido-cho minami-ku Nagoya 457-0811)

* 2 (株)青山製作所 (Aoyama Co.)

* 3 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Research and Development Laboratory, Daido steel Co., Ltd.)

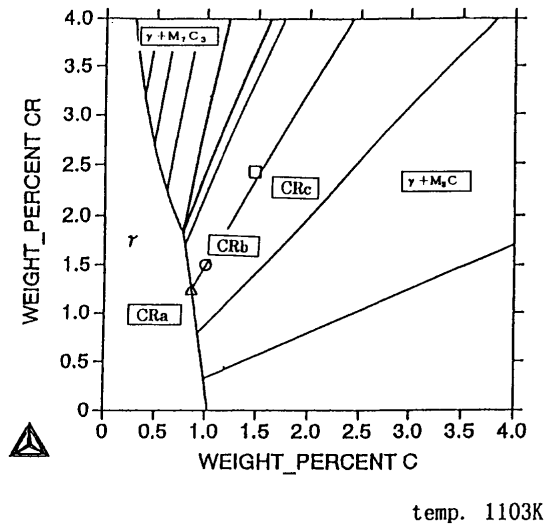


Fig. 1. Selection of material I alloy designed by thermo-calc method.

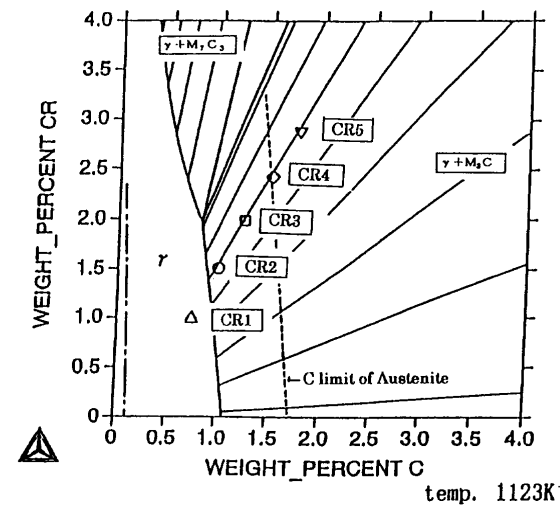


Fig. 2. Selection of material II alloy designed by thermo-calc method.

類(これをCR 1とする)を加え合計5種類とした。供試材 I と供試材 II における析出炭化物($\gamma+M_3C$)の制御は、Table 2で示す熱処理方法と温度条件を用いたが、基本的には熱間鍛造した直径40mm、長さ205mmの素形材を910°Cで焼きならし後、球状化处理のための熱処理を行い、直径35mm、長さ200mmの寸法形状に切削加工後、再度の焼き入れを810°Cで行い、最終段階で150°Cの焼き戻しを行った。ただし供試材 II では析出炭化物の粒子の成長と、硬さオーダーが等しくなるように焼き戻しの温度と処理時間を制御した。なおそれぞれのタイラインから求めた炭化物の体積分率(wt%)は供試材 I ではおよそ12.9, 15, 22.5であり供試材 II では15.3, 19, 23, 27となる。

2・2 顕微鏡組織と硬さ

供試材の析出炭化物が目的とする組織状態($\gamma+M_3C$)を構成しているか、供試材各種より1本を任意に選び、長手方向で幅15mm程度に切断した中からランダムサンプリングした。採取したこの試料を半径断面の表層から4.4mmの位置にてSEM型電子顕微鏡で組織観察と視野面積10150 μm^2 で画像解析を行った。供試材 I では、粒子の度数分布を測定し面積率、平均粒径を求めた。供試材 I の析出炭化物が占める面積の割合はCRa1.30%, CRb5.19%, CRc16.94%となり最小面積CRaと最大面積CRcとの差は約13倍ほどである。また測定した炭化物の平均粒子径は、それぞれCRa0.59 μm , CRb0.65 μm , CRc0.87 μm で最大であるCRcと、最小のCRaの比は約1.5倍ほどの差である。硬さはロックウエル硬度計(Cスケール)を使い、材料の半径断面方向で表層から中心まで1mm間隔で測定し変化を調べた。なお測定場所は2ヶ所について90度ずらして行った。その結果、外縁部より深さ0.5mmまでは脱炭層と考えられる硬度低下領域(被削材ではこの部分を削除した)を確認したが、これを除いた内部では、 H_{RC} の平均値はそれぞれCRa62, CRb64,

Table 1. Chemical composition of materials tested.

Materials I (mass %)												
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	S-Al	N	Remark
CRa	0.85	0.21	0.31	0.015	0.006	0.10	0.09	1.24	<0.01	0.020	0.011	
CRb	1.00	0.20	0.31	0.015	0.005	0.10	0.09	1.54	<0.01	0.020	0.011	SUJ-2
CRc	1.48	0.20	0.31	0.014	0.005	0.10	0.09	2.44	<0.01	0.018	0.011	

Materials II (mass %)												
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	S-Al	N	Remark
CR1	0.74	0.20	0.31	0.016	0.004	0.10	0.09	1.00	<0.01	0.019	0.010	
CR2	1.01	0.20	0.31	0.016	0.004	0.10	0.08	1.51	<0.01	0.020	0.011	SUJ-2
CR3	1.25	0.20	0.31	0.017	0.004	0.10	0.08	1.96	<0.01	0.020	0.012	
CR4	1.51	0.20	0.30	0.016	0.004	0.10	0.08	2.42	<0.01	0.019	0.010	
CR5	1.76	0.20	0.30	0.016	0.005	0.10	0.08	2.86	<0.01	0.019	0.010	

Table 2. Preparation of materials.

Materials I (ϕ :35mm 1:190mm)	Materials II (ϕ :35mm 1:190mm)
50kg Vacuum induction furnace	150kg Vacuum induction furnace
Hot forging	Hot forging
Normalized 1183K	Normalized 1183K
Spheroidized 923K·1.5h → 1063K·3.1h → 1003K·1.7h 1033K·1.7h → 923K → A.C	Spheroidized 923K·1.5h → 1063K·3.1h → (0.5h) → 1003K·1.7h → 1.2h → 1033K·1.7h → 10.5h → 923K → A.C
Machining	Machining
Quenching 1153K·1h (OQ)	Quenching 1153K·1h (OQ)
Tempered 423K	Tempered 423K·1h

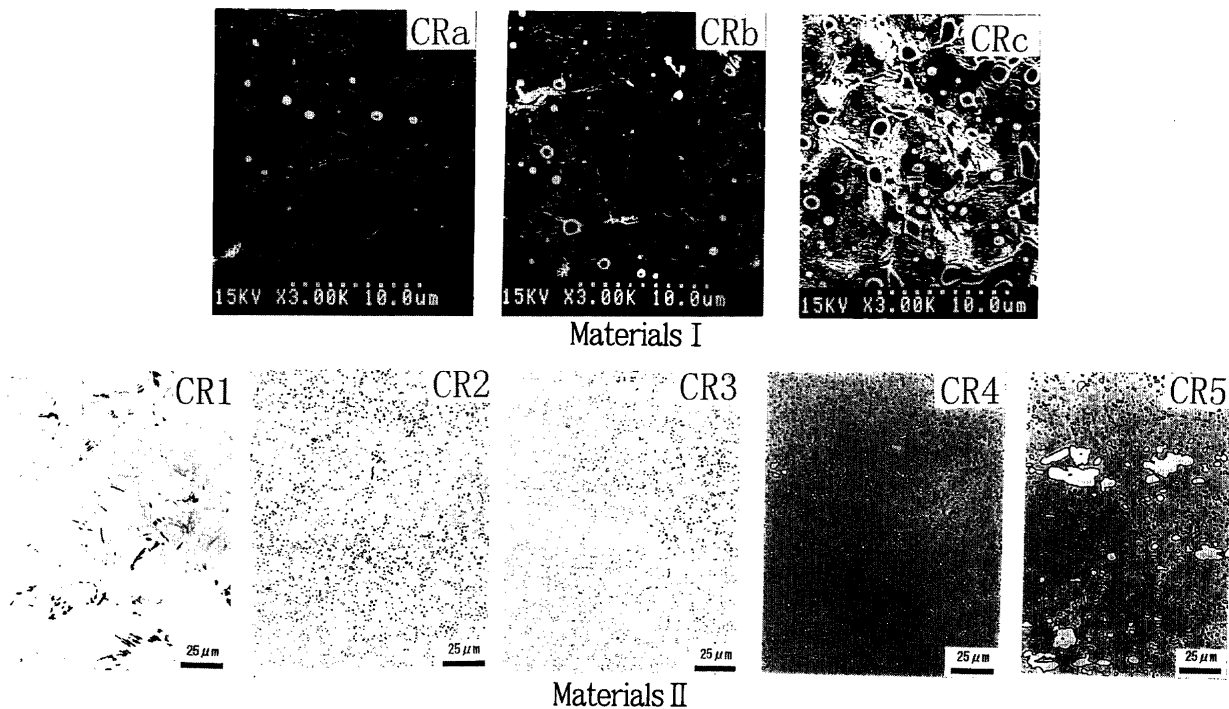


Fig. 3. Scanning electron microscopic (Material I) and optical microscopic (Material II) observation of metals tested.

CRc66であり粒子径の平均値が大きくなるにつれ $H_R C$ は高くなっている。

供試材IIでは、組織内の析出炭化物の粒子間隔を中心に調べた。粒子間距離は画像解析装置を使い面分析法により求めた。各材料における炭化物の粒子間距離は、CR2が $1.31\mu\text{m}$ 、CR3は $0.92\mu\text{m}$ 、CR4で $0.84\mu\text{m}$ 、CR5では $0.72\mu\text{m}$ であった。最大値であるCR2と最小値であるCR5の差は約2倍近くにある。当然の事ながらCR1は、炭化物が全く析出していない完全固溶状態をもつ組織であることも確認できた。また粒子間距離については、画像解析で求めた

平均粒子径と理論式⁷⁾を使い算出した値と、面分析により実測した値を比較検討した結果、その関係は近似していることを確認した。内質の硬さはCR1、CR2、CR3、CR4、CR5のいずれとも $H_R C62$ の数値を示したが、いずれの材料とも供試材Iと同様に表層近傍で硬さが低下する部分を確認されたので、実験にあたってはこの領域を削除して被削材とした。供試材Iと供試材IIの組織内に析出する炭化物について半径断面方向で表層より25mm地点でのSEM写真および光学顕微鏡写真をFig.3に示す。

Table 3. Cutting conditions.

	Experimental I			Experimental II		
	100	150	(m/min)	50	100	150 (m/min)
Cutting speed (V)	0.1	0.25	(mm)	0.1		(mm)
Depth of cut (d)	0.1		(mm/rev)	0.1		(mm/rev)
Feed rate (f)	Dry			Dry		
Coolant	Al ₂ O ₃ +SiC whisker (SiC)			Al ₂ O ₃ +TiC (TiC)		
Tool	Al ₂ O ₃ +TiC (TiC)			0.8 (mm)		
Nose radius	0.8 (mm)			0.8 (mm)		

3. 実験方法および切削条件

芯間860mm, 振り350mmのNC旋盤による乾式外周旋削で実験を行った。供試材 I を使用する場合(実験 I)では、切削工具にSiC whisker 強化型セラミックスとAl₂O₃基TiCコーティングの2種類のチップを使用した。供試材 II を使用する場合(実験 II)では、Al₂O₃基TiCコーティングチップのみを使用した。いずれの工具もすくい角(α)は -6° 、刃先丸味半径0.8mmのスローアウェイ型である。実験 I と実験 II での切削条件の詳細をTable 3 に示す。工具摩耗の測定は、工具顕微鏡を使い摩耗幅長さ(以下 V_B とする)を所定の時間毎に切削を停止させて逃げ面摩耗の中央部分で測定し、この V_B が0.3mmに達した時点を工具寿命(判定基準)とした。また切削開始直後に起きる切り刃の突発的欠損を考慮し、初期摩耗領域では測定頻度を高めた。あらさは、触診式あらさ計を使い、仕上げ面の最大あらさ(R_{max})を求め、参考までに中心線平均あらさ(R_a)、十点平均あらさ(R_z)をも測定した。一方、切削中における工具すくい面と仕上げ面の炭化物粒子の挙動観察は、工具離脱型切削急停止装置を使い無段変速付き普通旋盤で行った。

4. 実験結果および考察

4.1 炭化物と被削性

実験 I では、被削材と工具寿命時間の関係について、切削条件の中で速度(V)、切り込み(d)、工具材種を変化させ調べた。この結果をFig. 4 に示す。最も長い工具寿命時間が得られた切削条件としては、切削工具がTiCコーティング工具、切削速度(V)100m/min、切り込み(d)0.1mmの場合である。寿命はCRaでおよそ75min程度、CRbが65min、CRcは50minとなり、CRcはCRaの67%程となる。ところで、前述と同じ切削条件下でもSiC whisker 強化型工具を使い切削した場合の工具寿命はCRaが約19min程、以下順に、CRb10min、CRcは6 min程と全般にかなり短いものとなっている。切削速度が早くなるV:150m/min、d:0.1mmでのTiCコーティング工具ではCRaが35min、CRbでは28min、CRcは25minほどとなる。またこれと同じ条件をSiC工具で

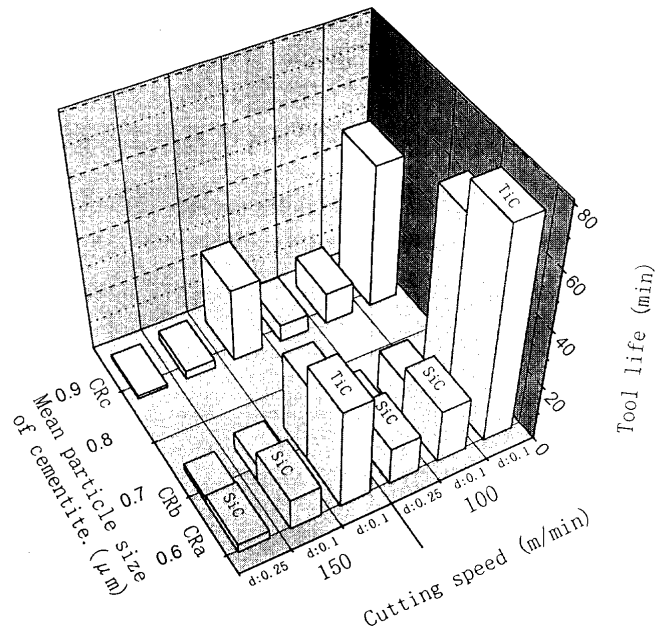


Fig. 4. The relationship between tool life and materials tested.

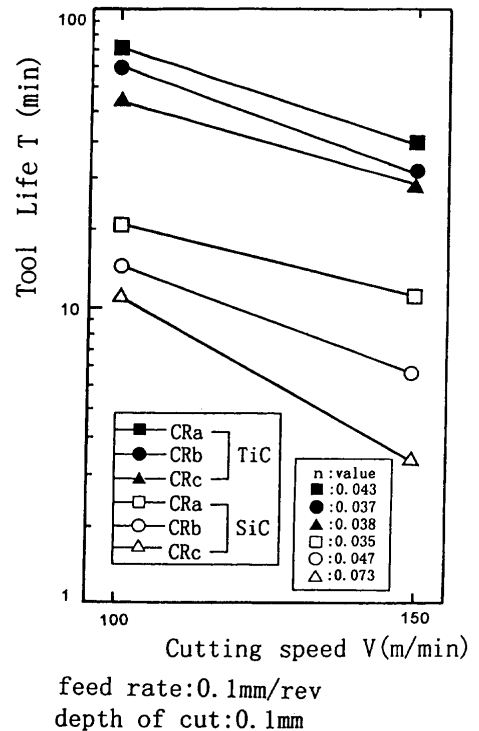


Fig. 5. The relationship between the cutting speed and Tool life.

みるとさらに寿命時間が全体に短くCRaは約11min程度、CRb、CRcはそれぞれ6 min、3 minとなっている。Fig. 5 に切り込み(d)0.1mm、送り量(f)0.1mm/revでのV-T曲線を示す。一方、切り込み量が多くなる場合を、SiC工具の切削速度(V)150m/minと比較すると、切り込み(d)0.1mmでのCRaは11min程であるのに対し、切り込み(d)0.25mmでは、Fig. 4 に示すように、わずかに3 min程度となる。以下CRbの6 minが2 min程度、CRc 3 minが1 min程度と大幅に工具寿命は短くなる。すなわち、析出物が多く介在した高

硬度材料を切削する場合では、切り込み量の増加は工具にかなり厳しい切削条件であると言える。また切削速度が早くなると工具摩耗量が大きくなる理由のひとつとしては、速度が早くなるほど炭化物との衝突回数が大きくなる事に加えて炭化物との擦過による切削温度の上昇による影響を受けることが考えられる。一方、工具材種によって寿命が異なる主な理由としては、TiCコーティング工具の抗折力は784(MN/m²)であるのに対し、SiCウィスカー強化型工具では718(MN/m²)であり、この数値の違いが影響しているものと考えられる。以上これらの結果より炭化物の粒子径が大ききその析出する面積割合が高い材料ほど工具寿命は短くなり、切削速度が早くなる場合ほど摩耗はより大きくなる。また切り込み量の増大は工具寿命を一層短いものとする。

4・2 急停止装置による観察

供試材IIの中から刃先のアブレイブな摩耗に最も影響が大きく作用すると考えられる、炭化物の粒子間隔が最も狭いCR5を選び出し、工具離脱型急停止装置を用いて切削中の炭化物の挙動を調べた。特に工具すくい面と接触する切りくず裏面側と切削により生成された新生加工面のそれぞれ2カ所の観察に注意を払った。急停止装置で求めた切削過程での炭化物の状態をFig. 6に示す。その結果、組織内に分散する炭化物粒子は、切り刃の進行により切りくずと母材に分離された後、切りくず裏面側では刃先の丸味形状によっても破碎、分裂することなく原形に近い状態で切り刃と接触している。一方、新生加工面上にある炭化物粒子は、楕円形状に変形する状態となっている。このことは、切り刃の進行に伴い背分力による高い面圧と刃先の丸味によるバニッシュ作用を受けるために生じる現象と考えられる。

4・3 粒子間距離の影響

実験IIでは、粒子間距離長さが異なる材料での仕上げ面あらさについて $V_B=0.3\text{mm}$ における最大あらさ(R_{max})を測定し理論最大あらさ($R_{\text{max(th)}}$)との比、 $R_{\text{max}}/R_{\text{max(th)}}$ を求め、

粒子間距離との関係を調べた。その結果、粒子間距離が短くなる供試材ほどその比は大きくなることが判った。しかも切削速度が早い150m/minではその変化が大きく、供試材中の粒子間距離が最も長いCR2の値はおよそ2.8程であった。一方、粒子間隔が最も短いCR5では約4.3とCR2に比べほぼ1.5倍ほど大きくなっていった。しかし、切削速度50m/minと100m/minでは、供試材ごとの変化は150m/minほど小さくなく、およそ1.5から2.5倍の範囲で安定していた。次にこれら材料の切削抵抗の3分力を求めたところ一般的な機械構造用鋼を切削する場合とは異なり高硬度材料を切削する場合に見られる主分力に比べ背分力が大きくなる結果⁹⁾と一致するものであった。すなわち、供試材の硬さが非常に高いために切り刃の食い込みに対する反力が大きいこと、さらに切削により工具逃げ面の摩耗が増加し接触面積が大きくなることに加えて、切り刃の鋭利さが損失することがその理由と考えられる。ところで、粒径の大きい高硬度粒子が介在する材料を、切削する場合の工具摩耗は、この粒子によるアブレイブ摩耗がその主たるもので、この場合の摩耗量は、工具切り刃が被削材を切削しながら移動する長さ、すなわち、切削距離に依存し増加する⁹⁾と言われている。一方、供試材のごとくタイラインが直線関係として成り立つ場合には、炭化物の体積分率よりその関係を明らかにすることはごく当然のことと考えられる。しかしながら、材料の組成成分中にCrが存在する場合、 γ 域におけるCの固溶限は低C側に移行し、その後析出する $\gamma+\text{Fe}_3\text{C}$ の量も変化するため、タイラインを使い計算によりその体積分率を求めた場合の正確さについてはまだ問題も多い。そこで任意の断面に存在する、粒子間距離を使い工具摩耗を把握する方法の方がより簡便であると考えられる。それ故、炭化物の粒子間距離に注目し実験結果を解析した。工具寿命判定基準として設定した $V_B=0.3\text{mm}$ に到達するまでのCR2, CR3, CR4, CR5の各材料ごとの切削距離(これを $L_{\text{CR2}}\sim L_{\text{CR5}}$ とする)を求め、炭化物の粒子間距離との関係を調べた。つ

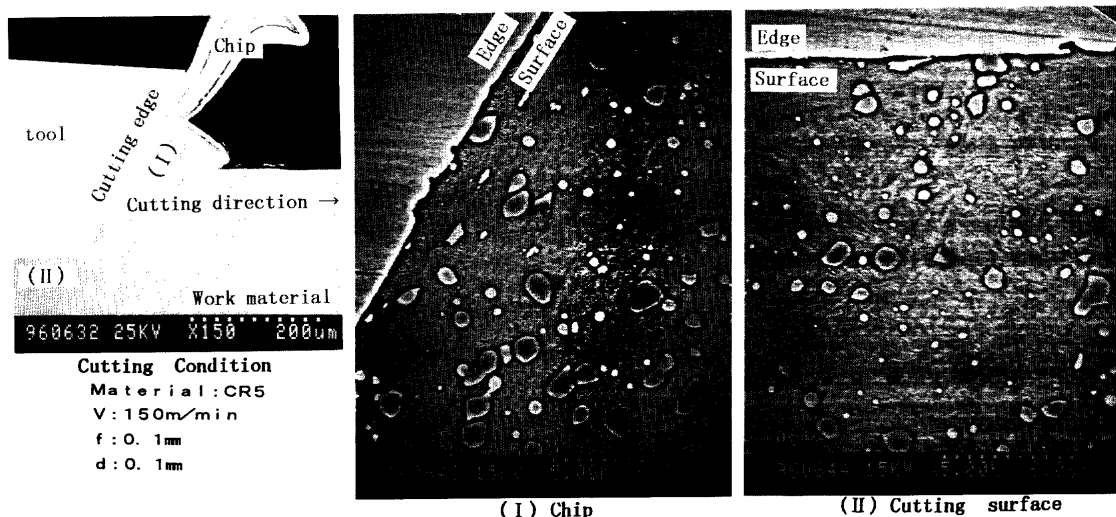


Fig. 6. Microscopic observation of cutting surface by quick stop motion apparatus.

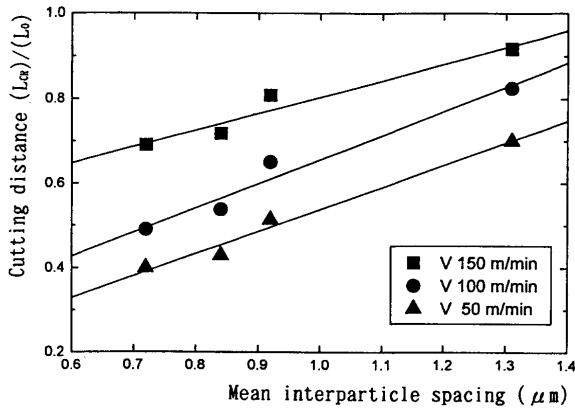


Fig. 7. Effect of mean interparticle spacing on relative cutting distance L_{cr} / L_o in material II.

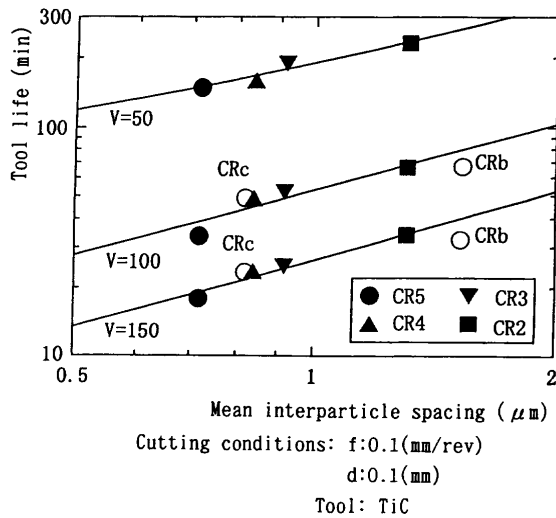


Fig. 8. The relationship between tool life and interparticle spacing in material II.

いて炭化物が全く析出しないCR 1 材の切削距離 (L_o) を求めた。この L_o を基準とした場合の各材料ごとの比 (L_{cr}/L_o) を求めこれを縦軸にし、横軸に平均粒子間距離を取り、切削速度別にその相関関係を、最小二乗法より 1 次近似した。これを Fig. 7 に示す。その結果、150m/min で 0.390、100m/min と 50m/min ではそれぞれ 0.572、0.524 となる傾きを持つ直線が得られた。切削速度 150m/min ではその数値が他の 50、100m/min に比べ少し小さいものとなっている。しかしいずれにしても、組織内に析出する粒子の間隔が狭くなるほど、工具寿命に達するまでの切削距離は、より短くなることを意味している。

次に、工具寿命時間をこの粒子間距離から予測する実験式について検討を行った。まず、この実験で用いた供試材 II より求めた $V_B : 0.3\text{mm}$ までの工具寿命時間 (T) とそれぞれの供試材における平均粒子間距離 (D_L) との関係を切削速度別に取り、最小二乗法による 1 次近似直線を求めた。

その結果、
150m/min では

$$T_{150} \cong 26D_L + C_{150} \dots\dots\dots (1)$$

100m/min では

$$T_{100} \cong 50D_L + C_{100} \dots\dots\dots (2)$$

50m/min では

$$T_{50} \cong 145D_L + C_{50} \dots\dots\dots (3)$$

が得られた。ここで、 C_{150} 、 C_{100} 、 C_{50} はそれぞれの切削速度における係数を示す。これらの関係を Fig. 8 に示す。そこで、得られたこれらの式の実用性について、供試材 I である CRb と CRc の 2 種類の材料を使い検討を行った。方法としては、画像解析から得られた炭化物の平均粒径を使い算出した粒子間距離と、この実験で求めた $V : 100, 150\text{m/min}$ における寿命時間を、近似直線を示す Fig. 8 にプロット (図中に白丸で表示) した。その結果、粒子間距離が長くなる場合には、実験式から推察される工具寿命と多少の差が見受けられる。しかしながら、この実験式を活用すれば限定された条件下ではあるが、炭化物の粒子間距離からも工具寿命を推定することが可能となる。

5. 結論

SUJ 2 材を基本成分とし、硬さ、炭化物の粒径、面積率、含有量が異なる試料と母相の硬さをほぼ一定にしマトリックス成分を変えないで C と Cr のみを変化させ、炭化物の粒子間距離を変化させた試料を使い工具寿命と組織の関係を検討した。その結果、次の結論が得られた。

- (1) 工具寿命時間は析出炭化物の粒径、面積率の高くなる材料ほど短く、しかも切削速度の影響を受けやすい。
- (2) 炭化物の平均粒子間距離から工具寿命時間を推定することが可能な実験式を得た。
- (3) 工具寿命に達するまでの切削距離は、炭化物の粒子間距離に影響される。
- (4) 切削により得られる仕上げ面あらさは、析出炭化物の影響を受ける。

文 献

- 1) N.Narutaki and Y.Yamane.: Annals of Cirp, 28 (1979), 23.
- 2) Y.Matsumoto and M.Barash: Proc. of the 6th Int. Conf. on Production Engineering JSPE, Osaka (1987), 64.
- 3) K.Nakayama, M.Arai and T.Kand: Annals of. Cirp, 37 (1988), 89.
- 4) 土井英和: 新金属材料, (1982).
- 5) H.K.Tonshoff, D.Brandt and H.G.Wobker: 1th Int. Mach. and Grind. Conf., SME, (1995), 965.
- 6) 荒木, 谷地, 吉松, 鉄と鋼, 51 (1965), 1071.
- 7) 改訂 3 版金属便覧, 日本金属学会編, 丸善, 東京, (1971), 614.
- 8) 狩野勝吉, 難削材の切削加工技術, 工業調査会, 東京, (1989), 213.
- 9) E.Rabinowicz, L.A.Dunn and P.G.Russel: A study of Abrasive Wear under Threebody Conditions, Wear, 4, Elsevier, Amsterdam (1961), 345.