切削工具の凝着機構の微視的解析と欠損防止法*

——切削工具材の表面工学的解析と欠損防止に関する研究(第2報)——

飯 島 昇** 竹 山 秀 彦*** 山 本 幸 弘†

Microscopic Analysis of Metal Adhesion on Tool Surface and Prevention of
Brittle Fracture of Tool Material
—Study on Surface Characterization of Cutting Tool Material and Prevention of
Its Brittle Fracture (Part 2)—

Noboru IJIMA, Hidehiko TAKEYAMA and Yukihiro YAMAMOTO

In the 1st part of this study it was demonstrated that the surface treatments or processings of cutting tool greatly affect adhesiveness of work material to the tool surface and hence tool life in view of brittle fracture due to metal adhesion. In this report the mechanism of initiation and growth of metal adhesion on the tool surface, and the process of brittle fracture of tool material due to metal adhesion are analyzed microscopically in order to develop practically justifiable surface treatments or processings to prevent brittle fracture of tool material which is caused by metal adhesion.

Key words : tool material, surface treatments, surface processings, surface characterization, metal adhesion, brittle fracture of cutting tool

1. 結 言

本研究の第1報¹⁾において、切削工具の表面処理法のいかんによって、被削材の工具表面への凝着傾向、さらには凝着欠損からみた工具寿命において著しい差異を生ずることを示し、その背景を切削抵抗、切削仕上面粗さおよび工具の加工変質層など主として巨視的に検討した。本報においては、工具表面における被削材凝着の発生、成長、さらには欠損に至る過程を微視的に観察することによって凝着欠損防止のための工具表面処理法の開発への糸口を見い出すことを目的としている。

2. 工具表面における金属凝着の微視的解析

2.1 実験方法

Loladze ら²⁾は、切削距離 20 m 程度の短時間切削試験から工具材選択などのために有効な情報が得られるとしているが、本実験では切削距離をわ

ずか 3 mm とした瞬間切削試験を行い、極く初期の金属凝着の状態を微視的に調べる方法をとった。図1は瞬間切削試験の概要を、表1はその切削条件を示したものである。すなわち、アプローチ角 0° の工具で、旋盤による瞬間2次元切削を行い、工具すくい面上のビッカース圧痕を参照して観測点を固定し、反復追跡観測を SEM によって行った。この際、切りくずとすくい面との重複接触を避けるために被削材幅の3倍の高送り (3 mm/rev) を用いた。なお、本実験に用いた被削材は炭素鋼 S45C (硬さ 180 HB, 引張強さ 0.63

(b) Setup for instantaneous single cutting

Fig. 1 Device of instantaneous single cutting

* 原稿受付 昭和 60 年 3 月 22 日。昭和 59 年度精機学会春季大会学術講演会 (昭和 59 年 3 月 25 日) にて発表

** 正 会 員 東京農工大学工学部 (小金井市中町 2-24-16)

*** 正 会 員 東京農工大学工学部 (現、幾徳工業大学; 厚木市下荻野 1030)

† 正 会 員 三菱電機 (株) (伊丹市瑞原 4-1)

Table 1 Cutting condition

Type of cutting	Orthogonal cutting
Cutting speed	$V=5-80$ m/min
Width of cut	$b=1$ mm
Depth of cut	$a=0.15$ mm
Feed rate	$S=3$ mm/rev
Tool	WC-Co cemented carbide tip, Coating tip (TiN, TiC) (-5, -6, 5, 6, 0, 0, 0)
Work material	Carbon steel S 45 C, Ni base heat-resistant alloy Inconel 718
Cutting fluid	Dry
Lathe	500×650 mm, 11 kW

GPa) および Ni 基耐熱合金 インコネル 718(硬さ 408 HB, 引張強さ 1.38 GPa, 主要成分: 51.84% Ni, 1.07% Ti, 19.38% Fe, 18.9% Cr, 3.09% Mo) である。

2.2 初期凝着の機構の解析

工具表面への金属凝着の足場が工具材組織のどの部分に形成されるかを知ることは本研究の目的からみて極めて重要である。そこで、粒径 $10\mu\text{m}$ の細粒ダイヤモンド砥石で研削された超硬合金工具 V 40 を用いて、炭素鋼 S 45 C を前記瞬間切削法で 6 回反復切削を行った後、すくい面上の切りくず接触領域を EPMA で線分析し、図 2 のような結果を得た。図の (a) の場合、W-L α , Co-K α および Fe-K α の 3 種の特性 X 線を追跡したが、Co と Fe の曲線が相似となっていることから (Co-Fe の相関係数 r_{CoFe} のみが正で他は負となっている)、Fe は Co 結合相上に選択的に凝着していることが理解される。これは、Co が WC よりも凝着活性であることに起因していると考えられる(鈴木³⁾)は、それぞれの活性化エネルギーを、 $Q_{\text{wc}}=48$ kcal/mol および $Q_{\text{Co}}=38.4$ kcal/mol としている)。

一方、Ni 基耐熱合金 インコネル 718 についての前記と同様の試験結果は図 2 (b) に示す通りである。ただし、耐熱合金を切削した場合には工具が異常なまでの凝着欠損を起こすことから、切削速度を 5 m/min, 反復切削回数を 1 回とした。図 2 (b) の線分析の相関係数から、インコネル

Fig. 2 EPMA linear analysis of face of WC-16.0%Co cemented carbide tool after instantaneous single cutting
Width of cut; 1 mm, Depth of cut; 0.15 mm, Feed rate; 3 mm/rev

718 の初期凝着の足場は Co 結合相のみならず超硬合金上で広範囲に薄膜状の凝着が生じていると観測される。この図 2 の結果から、被削材のインコネル 718 と炭素鋼 S 45 C の超硬合金工具への凝着が異なった挙動を示していることが考えられる。

2.3 工具表面における金属凝着の過程

2.3.1 ダイヤモンド砥石研削仕上の場合

粒径 $10\mu\text{m}$ の細粒砥石研削による超硬合金工具 V 40 および K 10 を用いて炭素鋼 S 45 C の瞬間切削実験を反復した工具すくい面上の一定観測点の SEM 像をそれぞれ図 3 と図 4 に示す。いずれの場合も瞬間切削の反復とともに Co 結合相が部分的に消失してい

Fig. 3 Example of initial metal adhesion of carbon steel S 45 C on face of WC-16.0%Co cemented carbide tool ground with diamond wheel (10 μm) in instantaneous single cutting
Cutting speed; 80 m/min, Width of cut; 1 mm, Depth of cut; 0.15 mm, Feed rate; 3 mm/rev

るのが認められる。2.2項において、Feの初期凝着の足場がCo結合相上に形成されることを述べたが、そこに強固に凝着した金属が離脱する際にCo結合相も共に持ち去られたものと考えられる。

一方、図5は粒径 $52\mu\text{m}$ の粗粒ダイヤモンド砥石により研削した超合金工具K10のすくい面であるが、この場合は図3でみられたような多量の凝着物は認められず、Co結合相の変化もほとんどない。このような著しい相違をもたらした原因としては、粗粒砥石による研削ではWC粒子が破碎され、これがCo結合相に埋め込まれて組織が微細化されるとともに、凝着の足場となるCo量が相対的に減少する(第1報¹⁾図9(b)参照)ためと考えられる。組織の微細化と凝着傾向との関連については、山本⁴⁾の炭素鋼の摩擦における研究で、鋼組織中のフェライト相の微細化により凝着や焼付きが生じにくいという結果と同じ機構であると推察される。

一方、耐熱合金インコネル718を切削した場合は図6でみられるように、炭素鋼S45Cの場合と異なり、WC粒子を含め各処で凝着が生じ、そこを核として凝着物の堆積が進むことや、反復切削後にはCo結合相だけでなく、処々でWC粒子そのものが持ち去られているのが観察される。これらのことやEPMAの線分析結果から、インコネル718の場合は、Co結合相のみならずWC粒子上にもかなり強固な凝着の足場が形成され、反復切削によりそこに大きな

Fig. 4 Example of initial metal adhesion of carbon steel S45C on face of WC-4.0%Co cemented carbide tool ground with diamond wheel ($10\mu\text{m}$) in instantaneous single cutting
Cutting condition same as in Fig. 3

Fig. 5 Example of initial metal adhesion of carbon steel S45C on face of WC-4.0%Co cemented carbide tool ground with diamond wheel ($52\mu\text{m}$) in instantaneous single cutting
Cutting condition same as in Fig. 3

Fig. 6 Example of initial metal adhesion of Ni base heat-resistant alloy Inconel 718 on face of WC-16.0%Co cemented carbide tool ground with diamond wheel ($10\mu\text{m}$) in instantaneous single cutting
Cutting speed; 5 m/min , Width of cut; 1 mm , Depth of cut; 0.15 mm , Feed rate; 3 mm/rev

せん断力が作用すると考えられる。

さらに、インコネル 718 を切削した超合金工具は、図 7 で認められるように、52 μm の粗粒ダイヤモンド砥石による研削の場合でも、炭素鋼 S 45 C を被削材とした場合と異なり、凝着物や工具表面の受ける損傷は著しく、細粒砥石による研削の場合と比べてほとんど変わらない。換言すれば、耐熱合金の切削では、ダイヤモンド研削砥石の粒度を変化させる程度のことでは凝着欠損の防止対策にはなりえないことを示している。

2.3.2 アルミナ砥石による研削仕上の場合

アルミナ砥石研削仕上の超合金工具によって炭素鋼 S 45 C の瞬間切削実験を反復した工具すくい面の走査電顕写真を図 8 に示す。これからわかるように、被削材である炭素鋼 S 45 C の凝着は全く認められず、わずかに深い研削痕中に付着しているにすぎない。

第 1 報¹⁾において、アランダム砥石により研削された超合金工具がコーティングチップとならんでもっとも凝着が少なく、凝着欠損に基づく寿命の長いことを示した。そして、この理由は、アランダム砥石研削による WC 粒子の破碎、砥石成分である Al_2O_3 や SiO_2 のような凝着不活性物質が Co 結合相に象眼されるとともに、表面に露出する Co 量の減少によるものと考えた。

図 5 と図 8 を比較してわかるように、アルミナ砥石で研削された工具と粗粒ダイ

Fig. 7 Example of initial metal adhesion of Ni base heat-resistant alloy Inconel 718 on face of WC-4.0%Co cemented carbide tool ground with diamond wheel (52 μm) in instantaneous single cutting
Cutting speed ; 60 m/min, Width of cut ; 1 mm, Depth of cut ; 0.15 mm, Feed rate ; 3 mm/rev

Fig. 8 Example of initial metal adhesion of carbon steel S 45 C on face of WC-4.0%Co cemented carbide tool ground with WA wheel in instantaneous single cutting
Cutting condition same as in Fig. 3

Fig. 9 Example of initial metal adhesion of carbon steel S 45 C on face of TiN(CVD)-coated tip in instantaneous single cutting
Cutting condition same as in Fig. 3

ヤモンド砥石研削面とでは、凝着傾向に質的相違があ

ることから、アルミナ砥石による研削面の凝着不活性の主因は、工具材組織の微細化でなく、砥石成分である Al_2O_3 や SiO_2 のような凝着不活性成分が Co 結合相へ象眼されるためであると考えられる。

インコネル 718 を切削した場合、アルミナ砥石で研削した超硬合金工具を用いてもかなり激しく凝着を生ずるが、ダイヤモンド砥石研削の場合と比較して工具表面の損傷は少ない。

2.3.3 コーティングチップの場合

図 9 および図 10 はそれぞれ TiN(CVD) と TiC(CVD) のコーティングチップにより炭素鋼 S 45 C の瞬間切削試験を反復したすくい面の SEM 像である。この結果からわかるように、両工具とも炭素鋼 S 45 C の凝着は極めて少ない。被覆材料の鉄に対する親和性は TiN の方が弱いといわれているが、本実験では両者の相違は認められない。

図 11 および図 12 はそれぞれ TiN(CVD) と TiC(CVD) のコーティングチップを用いて Ni 基耐熱合金インコネル 718 の瞬間切削試験を反復したすくい面の SEM 像である。この結果からわかるように、コーティングチップに対してはインコネル 718 の凝着が他の表面処理法を施した工具に比較して著しく少ない。このことは、コーティング層の剝離さえなければ、コーティングチップが Ni 基耐熱合金に対し、凝着欠損からみた工具寿命において優れていること⁵⁾を裏付けている。

Fig. 10 Example of initial metal adhesion of carbon steel S 45 C on face of TiC(CVD)-coated tip in instantaneous single cutting
Cutting condition same as in Fig. 3

Fig. 11 Example of initial metal adhesion of Ni base heat-resistant alloy Inconel 718 on face of TiN(CVD)-coated tip in instantaneous single cutting
Cutting condition same as in Fig. 7

Fig. 12 Example of initial metal adhesion of Ni base heat-resistant alloy Inconel 718 on face of TiC(CVD)-coated tip in instantaneous single cutting
Cutting condition same as in Fig. 7

Fig. 13 Effect of work material on initial metal adhesion at various cutting speeds in instantaneous single cutting

Tool; WC-16.0%Co cemented carbide tool ground with diamond wheel (10 μm), Width of cut; 1 mm, Depth of cut; 0.15 mm, Feed rate; 3 mm/rev

3. 凝着欠損の機構

凝着欠損が拡散現象のような速度過程に支配されるならば、凝着傾向を左右する因子は凝着活性化エネルギーと温度とが考えられる。図 13 は炭素鋼 S 45 C と Ni 基耐熱合金インコネル 718 を種々の切削速度で 1 回瞬間切削試験を行ったときのすくい面の凝着状態を比較したものである。これからわかるように、切削速度が増加し、したがって切削温度が上昇すれば凝着傾向が増大することが明瞭である。また、炭素鋼 S 45 C の場合よりインコネル 718 の場合の方が凝着傾向が大きいことは図 13 から明らかであるが、このことは後者の活性化エネルギーが前者のそれより小さいためだとは直ちにはいえない。

2.2 項で述べたように、鋼を切削した場合は Fe が Co 結合相に選択的に凝着を起こすが、耐熱合金を切削した場合は Co 結合相のみならず WC 粒子にも凝着を生じ、かつそれは超硬合金工具を欠損させるほど強固である。Miyoshi ら⁹⁾は、遷移金属の凝着傾向は、金属原子の d 軌道における電子充足度に依存することを報告しているが、Co, Ni および Fe では前記の電子充足度はいずれも 40% 前後であり、また活性化エネルギーにおいてもそれらの間にほとんど差は認められない。このことから、炭素鋼 S 45 C とインコネル 718 の超硬合金に対する凝着傾向の著しい相違を活性化エネルギーの相違から説明することは無理のように思われる。そこで、炭素鋼 S 45 C とインコネル 718 について、次元解析から M. C. Shaw によって得られた次式を用いて切削温度を推定することにする。

$$\theta = C_T \cdot u_p \sqrt{\frac{V \cdot S}{k \cdot \rho \cdot c}} \quad (1)$$

Data for calculating cutting temperature					
		Inconel 718	S45C	Shearing speed m/s	Vs 1.05
Shear stress on shear plane Pa	Ts	1.1×10 ⁹	0.5×10 ⁹	Chip flowing speed m/s	Vc 0.31
Shear stress on tool face Pa	Tt	1.2×10 ⁹	0.6×10 ⁹	Feed rate m/rev	S 0.001
Density kg/m ³	ρ	8220	7840	Shear angle deg	φ 17

Fig. 14 Relation between cutting speed and cutting temperature

ここで、 θ は切削温度上昇、 u_p は切削単位動力、 V は切削速度、 S は送り、 k は被削材の熱伝導率、 ρ は被削材の密度、 c は被削材の比熱、 C_T は定数である。

図 14 は上式により計算した*結果で、横軸に切削速度、縦軸にインコネル 718 と炭素鋼 S 45 C の切削温度をプロットしたものである。この結果からもインコネル 718 の切削温度が S 45 C に比べはるかに高いことがわかる。このように温度が高ければ、活性化エネルギーの大きな WC 粒子に対しても強い凝着を生ずることが容易に考えられる。

耐熱合金の切削の場合には、以上に述べたように、工具材組織の全面に凝着を生じ、しかも被削材の高温変形抵抗が炭素鋼に比べ圧倒的に大きいことから、工具面に生じた凝着層のせん断応力が非常に大きくなることが推定される。図 15 は、インコネル 718 を 1 回の瞬間切削を行った超硬合金工具 K 10 のすくい面上に

* 計算に使用した数値は、図 14 に記載したもののほか、熱伝導率、比熱などについては参考文献^{9)~11)}によった。

Fig. 15 Example of cracking of WC-4.0%Co cemented carbide tool due to metal adhesion on face in instantaneous single cutting
Cutting condition same as in Fig. 7

激しいき裂が生じた例である。摩擦力を伴う拡張されたヘルツ理論⁷⁾による計算⁸⁾からすると、工具面と被削材との摩擦係数が増加すれば、工具面上において、摩擦方向に対しトレーリング側の引張応力が急激に増大するため、超硬合金工具の場合も、この応力によって凝着欠損が生じると考えられる。

4. 結 論

- (1) 超硬合金工具で炭素鋼を切削した場合は、工具面への初期凝着は超硬合金のCo結合相に選択的に生じる。これは、CoがWCより凝着活性であることに起因していると考えられる。一方、Ni基耐熱合金インコネル718を切削した場合の初期凝着はCo結合相のみならずWC粒子上までに及ぶ。これは、切削温度が異常に高くなり、比較的凝着不活性なWC粒子にも凝着が起こりうることを示している。
- (2) アルミナ砥石により研削された超硬合金工具においては、工具材組織の微細化および研削砥石中の凝着不活性成分(Al_2O_3 , SiO_2 など)のCo結合相への象眼により、全体として凝着不活性とな

り、凝着欠損も抑制されることが微視的解析から確認された。

- (3) コーティング工具は全般に良好な耐凝着性を示す。
- (4) 粗粒ダイヤモンド砥石により研削された超硬合金工具では、組織の微細化およびそれに伴う工具表面層のCo量の相対的低下によって炭素鋼の凝着が抑制されることを微視的解析から確認した。

本研究は文部省科学研究費補助金(試験研究2)によって行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 竹山秀彦ほか：切削工具の凝着欠損に及ぼす工具表面仕上げの影響——切削工具材の表面工学的解析と欠損防止に関する研究(第1報), 精密工学会誌, **52**, 2(1986)279.
- 2) T. N. Loladze et al.: Short Time Method for Selection of Proper Cutting Tool Material, Ann. CIRP, **31**, 1, (1982) 45.
- 3) 鈴木一雄ほか：WC-20% Co 系超硬合金の耐酸化、耐衝撃性に及ぼすWC粒度の影響, 日本金属学会誌, **49**, 3(1976) 211.
- 4) 山本雄二ほか：ころがりすべり接触における炭素鋼の表面の変化について(第2報)および(第3報), 日本機械学会論文集, **39**, 319(1973) 253および**39**, 324(1973) 997.
- 5) 竹山秀彦ほか：耐熱合金の切削における工具材の適応性について(第2報), 昭和58年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集(1983) 625.
- 6) K. Miyoshi et al.: Friction and Wear Behavior of Single Crystal Silicon Carbide in Sliding Contact with Various Metals, ASLE Trans., **3**, 22, (1979) 245.
- 7) 川井謙一：転がり接触問題解析の一手法(第1報), 精密機械, **43**, 12(1977) 245.
- 8) 飯島 昇ほか：焼結ダイヤモンド工具の切削性能と摩耗解析(第1報), 精密機械, **50**, 7(1984) 1110.
- 9) 三菱金属(株)：耐熱合金データ集.
- 10) 日本金属学会：金属データブック, 丸善(1974) 105.
- 11) 例えば, 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.