切削工具寿命の解析的予測に関する研究 (第4報)*

——逃げ面摩耗特性の検討——

北川武揚** 前川克廣** 白樫高洋*** 臼井英治***

Study on Analytical Prediction of Cutting Tool Life (4th Report)
—Characteristic Equation of Flank Wear—

Takeaki KITAGAWA, Katsuhiro MAEKAWA, Takahiro SHIRAKASHI and Eiji USUI

Flank wear characteristics of tungsten carbide tools in turning plain carbon steels without built-up edge have been investigated by measuring temperature, normal stress and wear rate on the flank wear land. It is found that the crater wear characteristic equation, derived from the adhesive type wear model after M. C. Shaw in the previous paper, is able to describe the flank wear as well. However, the characteristic equation of flank wear consists of two characteristic lines with different gradient which intersect at the critical temperature of around 1150 K. It seems that the line in the low temperature side is affected by abrasives in the steels. This abrasion effect could be taken into account by changing the constants involved in the wear characteristic equation. On the other hand, an abrasive type wear equation could be derived so as to have the same expression as our wear equation. Observation of the wear particles by Uehara, however, appears to exclude the possibility of this wear model.

Key words: cutting tool life, flank wear, wear mechanism, wear characteristic equation, wear test, abrasion

1. ま え が き

前報¹⁾ではすくい面摩耗に関する既報²⁾³⁾の解析的予測法を逃げ面摩耗に拡張する準備として逃げ面摩耗痕と仕上面の接触状態を吟味し、切れ刃稜近傍を除けば弾性的にのみ接触し、塑性状態を生じないこと、摩耗痕各部の摩耗速度が一樣となるように応力分布、温度分布が生ずることを明らかにした。更に摩耗速度を与える適当な摩耗特性式があれば、切れ刃近傍の応力状態を境界条件として逃げ面摩耗痕上の応力分布、温度分布、摩耗速度を解析的に求められることを示した。本報はこの摩耗特性式に関するものであり、すくい面摩耗の解析に用いたものと同様な特性式が成り立つこと、アブレシブ摩耗の影響はこの特性式の特性定数の相違としてあらわれることを実験的に示したものである。

2. 逃げ面摩耗機構の考察

図1は既報³⁾のすくい面摩耗特性を示す図の再掲である。図示の直線は

$$\frac{dW}{\sigma_t dL} = C \exp\left(-\frac{\lambda}{\theta_t}\right) \quad (1)$$

と書け、これを用いてすくい面摩耗の解析的予測を行った。ただし W は摩耗面の単位面積あたりの摩耗体積、 L は摩擦距離、 σ_t は摩耗面の垂直応力、 θ_t は絶対温度であり、 C, λ は工具と被削材の組合せで決まる特性定数である。同図にみるように式(1)は高温域では実験結果によく適合するが、低温域での適合は十分でない。超硬工具による炭素鋼の実用切削条件ではすくい面摩耗の実験点の多くは図示のように適合性のよい高温域にあるが、逃げ面摩耗痕の温度はすくい面のそれよりかなり低いので式(1)をそのまま適用することはできないわけである。また同図の縦軸は対数尺のため低温域での実験誤差が強調されているが、実験点の配列は図示の直線を中心とするものではなく、特に炭素含有量が高いほど実験点は直線からはずれるよ

* 原稿受付 昭和61年8月29日、昭和52年度精機学会春季大会学術講演会(昭和52年4月5日)にて発表

** 正会員 北見工業大学(北見市公園町165)

*** 正会員 東京工業大学(東京都目黒区大岡山2-12-1)

Fig. 1 Crater wear characteristic of carbide P20 for different plain carbon steels

うに見える。

式(1)は既報²⁾のように凝着摩耗モデルに基づくものであり、一方低温域では炭素鋼中の硬粒子によるアブレシブ摩耗が優勢になるとの指摘⁴⁾があるから、式(1)の不適合はアブレシブ摩耗の寄与によるものかも知れない、実際 Rabinowicz⁵⁾によるアブレシブ摩耗の特性式は

$$dW' = K \frac{\sigma_t}{H'} dL \quad (2)$$

ただし、 K はアブレシブ粒子の形状その他に依存する定数、 H' は硬金属側(工具側)の硬度である。従って既報と同様の温度効果

$$H' = A_1 \exp\left(\frac{A_2}{\theta_t}\right), \quad K = B_1 \exp\left(-\frac{B_2}{\theta_t}\right) \quad (3)$$

を導入すれば

$$\frac{dW'}{\sigma_t dL} = C' \exp\left(-\frac{\lambda'}{\theta_t}\right) \quad (4)$$

と式(1)と同様に書くことができ、式(1)と合わせて全摩耗速度を

$$\frac{dW}{\sigma_t dL} = C \exp\left(-\frac{\lambda}{\theta_t}\right) + C' \exp\left(-\frac{\lambda'}{\theta_t}\right) \quad (5)$$

とし、右辺両項の定数が著しく異なる

ものとすれば後掲図6のような折線の摩耗特性として説明できそうである。しかし、この考え方は摩耗粉の観察結果から否定される。従来の知見によれば工具すくい面の応力状態は苛酷であり、見掛けの接触面積は真の接触面積に近く、切りくずの接触表面層には粘性流のような著しい塑性流れが熱軟化のために生じている。このような状況下でアブレーション摩耗が支配的であれば、切りくず表面の硬粒子が工具すくい面の低強度の拡散層を長く引っかくことに対応した摩耗粉が多く見られるはずである。しかし上原ら⁶⁾の観察結果によれば逃げ面摩耗ではもちろん、すくい面摩耗においても0.1~1 μ mの微細な摩耗粉のみが観察され、大型の摩耗粉は全く検出されていない。

一方、図1の低温域でも凝着摩耗が支配的で式(1)と同様の摩耗特性式が成り立つとすれば、高温域のそれとの定数値の相違をいかに説明するかが問題となる。また炭素鋼中の第2相介在物硬粒子が多量な場合と少ない場合を比べれば低温域はもちろん高温域においても摩耗速度が相違するのは明らかであり、アブレシブ摩耗の寄与をどのように考慮するかも問題である。本報告では後述のように第1の問題に対しては、高温域と低温域とで摩耗痕表面の拡散層の金属組織的状况が全く異なることから説明し、第2の問題については、アブレシブ摩耗の効果が式(1)の定数値の変化として高温域でも低温域でもあらわれることを実験的に示す。

3. 逃げ面摩耗特性の実験的検討

前項の論議から逃げ面摩耗についても式(1)の型の摩耗特性式が成り立つと予想されたので実験的に検討してみた。実験は丸棒材の長手準2次元旋削により行い、工具材には超硬合金P20種を、被削材(ϕ 150~200 $\times$ 300mm)には機械構造用炭素鋼を用いた。表1に被削材の化学成分を示す。工具形状は主として(0, 0, 6, 6, 15, 15, 0.5)とし、シャンクは30mm角、突出し量30mmとして振動のない安定な切削状態を得た。

摩耗痕の温度測定には板状超硬チップ(10 $\times$ 20 $\times$ 50mm)を2枚重ね合わせ、白金細線(ϕ 10 μ m)を石英管(外径 ϕ 50 μ m)に挿入したものをその重ね合わせ面に埋め込んだ特殊工具を使用した。図2はその構造

Table 1 Chemical composition of materials cut

wt%	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al
0.46%C steel	0.46	0.23	0.72	0.026	0.016	0.01	0.01	0.01	0.020
0.47%C steel	0.47	0.21	0.74	0.022	0.017	0.01	0.02	0.10	0.025
0.25%C steel	0.25	0.24	0.51	0.020	0.022	0.01	0.03	0.02	0.020

Fig. 2 Set-up for measuring temperature on flank wear land

Fig. 3 Temperature distribution on tool face
Cutting conditions
Material cut; 0.46% C carbon steel, Tool; carbide P 20
(0, 0, 6, 6, 15, 15, 0, 5), Cutting speed; 1.67 m/s. Feed;
0.26 mm/rev, Depth of cut; 2 mm, Cutting fluid; dry

と測定原理であり、摩耗痕部に露出した白金線は切削中に被削材と熱電対を形成する。白金線の露出位置を変更することにより摩耗痕各位置の温度を測定することができる。摩耗痕は研削によって -0.5° の逃げ角で横逃げ面に付与し、十分ななじみ切削の後に測定を行った。図3はこの方法による摩耗痕温度分布の実測結果であり、比較のために鋭利工具のすくい面温度も併記してある。添図中の記号が分布曲線の記号に対応

Fig. 4 Relation between temperature at the center of flank wear and cutting speed
Cutting conditions are the same as those in Fig. 3

する。同図は逃げ面摩耗幅 $V_B = 0.4$ mm の場合であるが、逃げ面摩耗痕温度はすくい面のそれと異なり全体的にはほぼ均一な分布となっていることがわかる。摩耗幅、切削速度、送りを変更した場合にも同様な結果が得られた。したがって温度分布は均一とみなし、摩耗痕の中央位置の温度で代表させることにした。図4はこの位置の温度が被削材種、切削条件によっていかに変化するかを示したものである。

摩耗痕の垂直応力については、常用される摩耗幅が僅々 0.6 mm 以下であり、分割工具法⁷⁾を用いても幅方向の分布を精度よく求めることはできなかった。しかし、この試行経験と前報¹⁾の解析結果によれば、垂直応力は刃先近傍を除けば摩耗幅方向にほぼ均一分布していると考えられる。そこで切れ刃方向にも均一分布と近似し、摩耗痕を付与した工具による切削抵抗と無摩耗工具の切削抵抗とを比較する方法⁸⁾によって平均応力を求めることにした。図5は摩耗痕垂直応力に及ぼす切削速度、送り、摩耗幅の影響を示すものであり、いずれの増大に対しても垂直応力が減少するのがわかる。例えば同図中の◎印は $V = 3.33$ m/s, $f = 0.2$ mm/rev, $V_B = 0.6$ mm なる標準的な条件に対応するが、垂直応力は 100 MPa 程度であり、同一切削条件下のせん断面せん断応力の 1/5~1/6 の大きさに過ぎず、摩耗痕が仕上面と弾性的に接触しているとする前報¹⁾の結果を裏づけるものとなっている。

(a) Influence of cutting speed

(b) Influence of feed

Fig. 5 Experimental result of mean normal stress on flank wear land

Cutting conditions are the same as those in Fig. 3

単位面積あたりの逃げ面摩耗速度 dW/dL は次式で計算することができる。

$$\frac{dW}{dL} = \frac{\tan \gamma}{V} \cdot \frac{dV_B}{dT} \quad (6)$$

ただし γ は逃げ角、 T は切削時間である。温度と垂直応力の測定におけると同様、横逃げ面に人工的に摩耗痕を付与した工具によって摩耗速度を測定している。図6は以上により求めた摩耗痕温度 θ_f 、垂直応力 σ_f 、摩耗速度 dW/dL を用いて、 $(1/\sigma_f)(dW/dL)$ と $1/\theta_f$ との関係を片対数グラフで示したものである。同図(a)の大きな記号は逃げ面摩耗の実験点であり、鋼中

(a) Comparison with crater wear

(b) Influence of cutting speed V , feed f , side rake angle α_s , side cutting edge angle C_s and width of flank wear land V_B **Fig. 6** Flank wear characteristics of carbide P20 when cutting plain carbon steels

の炭素含有量による相違を示している。図中の小黒丸印は図1のすくい面摩耗の実験点から0.46%C鋼のそれを抜き出し、精度は悪いが併記したものである。また同図(b)は0.46%C鋼の場合に異なる摩耗幅、切削条件の実験点がどの位置に配列するかを示している。両図より実験点はいずれも折れ線の直線上にほぼ

配列し、しかも、すくい面摩耗の実験点も同じ折れ線に対応するものとなっていることがわかる。その結果は逃げ面摩耗もすくい面摩耗も同じ摩耗特性に従うことを意味し、低温域の実験点が主となる逃げ面摩耗の場合でも高速切削などにより高温となれば、すくい面摩耗と同じ特性に従うことになる。また高温域の実験点が主となるすくい面摩耗についても同様である。なお両図より低温域でも式(1)型の摩耗特性式が成り立つのは明らかであるが、同図(b)にみるように低温域の逃げ面摩耗では精度の高い実験ができるので、同図(a)の逃げ面摩耗の鋼種による差異は意味があるように思われる。これについては後述するが、摩耗特性式を用いて工具摩耗、工具寿命を予測する場合にはこの程度の摩耗速度の相違は大きな誤差を生じない。したがって次報の解析的予測では同図(a)の点線に対応する摩耗特性式を用いることにする。

さて前項において、図6の低温域の直線がアブレシブ摩耗に対応するとは思えないことを摩耗粉の観察結果⁹⁾から指摘したが、なぜ高温域の直線と傾斜が異なるかを説明しなければならない。鳴瀧ら⁹⁾は炭素鋼と超硬合金間の静的拡散実験を行い、温度が1200 K以上に上昇すると超硬合金のWC粒が消失して界面にぜい弱なFe-W-Co複炭化物が生成すること、炭素含有量が少ないほど、また高温になるほど多量の複炭化物が生成することを示した。著者ら¹⁰⁾は切削実験に使用したS45C炭素鋼とP20超硬合金を用いて追試を行い、 $\theta = 1120 \sim 1170 \text{ K}$ ($1/\theta = 8.5 \sim 9 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$)以上で複炭化物が生成することを確かめた。実際の切りくず内の拡散元素濃度および原子空孔濃度は静的実験と異なるから一致は良好に過ぎるが、この温度は図6の直線の折れ曲がり位置のそれと良く対応している。従って図6の高温域と低温域では工具面表層の拡散層の状況が全く異なり、この結果摩耗特性定数の差異が生じたものと考えられる。

4. アブレーション摩耗の寄与

以上の論議から逃げ面摩耗でも凝着摩耗機構が支配的と思われるが、アブレシブ粒子の影響はどう現れるか実験的に検討してみた。Al₂O₃粒子を炭素鋼の性質を変えることなく多量に溶解・混入することは困難なので、やむを得ず以下の便法による実験を行ってみた。S45C炭素鋼の丸棒材(直径200 mm)の長手方向に図7に示す単一のV型溝(溝幅5 mm)を設け、鋼粉(80%)とプラスチック結合剤(20%)にアブレシブ粒子としてAl₂O₃粉末1000 wt・ppm(丸棒全体に対して)を混合したものを充てんした。Al₂O₃は粒径105

Fig. 7 Set-up for abrasion wear test

～149 μmのものと53～74 μmのものとを用いた。充てん物の固化後の圧縮破壊強さは100～120 MPaである。この丸棒材を図示のように三次元旋削すると溝部分の切削距離は丸棒円周の1/126であるから、鋼材部の切削で生じた摩耗面拡散層を溝部の多量のAl₂O₃粒子が1回転ごとに瞬間的に引っかくことになる。溝部分での逃げ面摩耗痕の温度は充てん物がなく空切削する場合でもほとんど低下しないことを示すことができる¹¹⁾。また摩耗痕の圧力は若干低下するであろうが、前報¹⁾で示したように仕上面との接触は弾性的なので極端な低下は生じないと考えられる。そこでS45C部分を切削するときの摩耗痕温度、垂直応力を用いて摩耗特性を検討してみた。

溝つき切削の場合、溝部分での切れ刃の小チップの発生などが避けられず、鋼粉と結合剤のみを溝に充てんした場合と溝なし丸棒の場合とでは摩耗速度が若干相違する。そこで鋼粉と結合剤のみの場合と更にAl₂O₃粒子を加えた場合との摩耗速度の差をとり、これを溝なし丸棒の場合の摩耗速度に加えることにした。図8は得られた結果であり、アブレシブ粒子の効果を示す摩耗特性線図である*。粒子添加により特性線はほぼ平行に移動しており、見掛け上、アブレーション摩耗の効果は式(1)の定数の相違として現れている。図6の低温域での逃げ面摩耗特性は鋼種によって同様な差異をみせており、パーライト中の硬炭化物のアブレシブ効果の相違によると考えられる。ただし図7の実験ではAl₂O₃粒子は溝部の鋼粉、結合剤中に

* この実験で用いた超硬工具は某社製P20であるが、同社は当時P20の材種内容を変更したため、図1.6の実験に用いた旧製品のP20を手でできなかった。このため図8のAl₂O₃粒子を含まない特性曲線の位置は図1.6のそれと一致していない。

Fig. 8 Wear characteristic curve showing effect of abrasion wear due to Al_2O_3 particles

Cutting conditions

Material cut; 0.47% C carbon steel, Tool; carbide P 20
(-5, -6, 5, 6, 15, 15, 0.4), Depth of cut; 2mm, Feed;
0.2 mm/rev, Cutting fluid; dry

集中して存在し、S 45 C 材中に分散している状況と異なるから、図 8 の結果は鋼中の硬粒子のアブレーション作用の直接の検証にはなっていない。

5. 結 論

炭素鋼を安定で構成刃先のない状態で連続旋削する場合の超硬工具の逃げ面摩耗について実験的解析を行い、以下の結論を得た。

- (1) 逃げ面摩耗はすくい面摩耗と同様、凝着摩耗モデルに基づく摩耗特性式

$$\frac{dW}{\sigma_f dL} = C \exp\left(-\frac{\lambda}{\theta_f}\right)$$

に適合する。

- (2) この特性式は片対数尺上で $\theta_f = 1150 \text{ K}$ 付近を折れ曲がり点とする折れ線の直線となり、被削材の炭素含有量、摩耗幅、切削条件のいかんによらず逃げ面摩耗はほぼこの特性曲線に支配される。 $\theta_f = 1150 \text{ K}$ 付近を境に摩耗特性が折れ線と

なるのは、これより高温で工具面に複炭化物が生成し、WC 粒界が消失するなど金属組織的变化が工具材に生じてしまうためである。

- (3) すくい面摩耗も前項と同じ摩耗特性式に支配される。ただし、すくい面摩耗の実験点は前項の折れ線の高温側直線上にあることが多く、逃げ面摩耗のそれは低温側直線上にあることが多い。

- (4) 鋼中のアブレイブ粒子の影響は摩耗特性式の定数の変化として高温域にも低温域にも現れると思われる。ただし低温域ほど影響が顕著に現れ、このため低温域では被削材の炭素含有量により $\frac{dW}{\sigma_f dL}$ は若干相違する。

謝 辞

本研究の実験に際しては、北見工業大学久保明彦、佐伯義二両技官の協力を得た。また実験に用いた Al_2O_3 粉末は、(株)昭和電工のご好意により提供いただいた。記して感謝の意を表する。

引 用 文 献

- 1) 臼井英治, 北川武揚, 前川克廣, 帯川利之, 白樫高洋: 切削工具寿命の解析的予測に関する研究 (第3報), 精密機械, **48**, 9 (1982) 1231.
- 2) 北川武揚, 白樫高洋, 臼井英治: 切削工具寿命の解析的予測に関する研究 (第1報), 精密機械, **42**, 12 (1976) 1178.
- 3) 臼井英治, 白樫高洋, 北川武揚: 切削工具寿命の解析的予測に関する研究 (第2報), 精密機械, **43**, 10 (1977) 1211.
- 4) 竹山彦彦, 村田良司: 工具摩耗の温度依存性, 精密機械, **27**, 1 (1961) 33.
- 5) E. Rabinowicz, L. A. Dunn and P. G. Russell: A Study of Abrasive Wear under Three-body Conditions, Wear, **4**, (1961) 345.
- 6) K. Uehara, H. Takeshita, K. Nishina and M. Sakurai: On the Generating Mechanism of Wear Particles of Carbide Cutting Tools, Proc. 2nd ICPE, Tokyo, (1976) 203.
- 7) 加藤 仁, 山口勝美, 山田又久: 工具・被削材の境界面に働く応力分布, 日本機械学会論文集, **37**, 298 (1971) 1228.
- 8) 大越 諄, 佐田登志夫: 切削工具逃げ面における摩擦現象, 精密機械, **23**, 8 (1957) 404.
- 9) N. Narutaki and Y. Yamane: Wear Mechanism of Carbide Tool Based on the Reaction between Tool and Work Material, Proc. 2nd ICPE, Tokyo, (1976) 190.
- 10) 北川武揚: 切削工具摩耗の解析的予測に関する研究, 東京工業大学学位論文, (1978) 143.
- 11) 白樫高洋, 井原 透, 臼井英治: 切削温度を考慮した断続切削時の切れ刃欠損発生予測, 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) 599.