問題が多い。

(5) 対策として次の三つがある。

(i) 突切りバイトを前後に往復させながら端面

を仕上げる。

(ii) テーパーポリゴンを用いる。

(iii) フライス方式のポリゴン削りとする。

621.9.027.4-492.8:621.762.1

セラミックバイトの寿命曲線について*

(第1報, 寿命方程式の適用範囲)

奥 島 啓 式**, 藤 井 義 也***

On the Life-Diagram of Ceramic Tools

(1st Report, Applicability of the Tool Life Equation)

by Keiji OKUSHIMA and Yoshiya FUJII

With brittle tool materials such as carbide and ceramic tools, the relationship between tool life T and cutting speed V cannot be expressed by a single line on the so-called V - T diagram. It consists of more than two lines having different inclinations. It has been clarified in this paper that such a phenomenon is caused by the presence of the welded fragment on the cutting edge at low cutting speeds and heat shock at high cutting speeds. Furthermore the numerical critical value with cutting conditions has been obtained from theoretical and experimental results.

1. 緒 言

切削作業において, ある切削条件における工具の取換え時間, すなわち工具寿命をあらかじめ知っておくことが望ましい。従来から 高速度鋼工具の工具寿命-削り速度線図は両対数方眼紙において直線で与えられ, いわゆる寿命方程式 $VT^n=C$ (ただし V : 削り速度 m/min, T : 工具寿命 min, n および C : 定数) が成立するとされて, VT 線図が与えられるならば実験をしなくても切削工具の寿命を推定することができた。ところが超硬およびセラミック工具の寿命線図はしばしば両対数方眼紙上で1本の直線で与えることができず, 削り速度の全範囲にわたって1個の寿命方程式で表わせないことがある。この現象は特にセラミック工具において著しい。

第 1 表 被削材の成分・性質

化 学 的 成 分 %							かたさ	引張強さ	伸び
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	H_{RB}	kg/mm ²	%
0.44	0.33	0.65	0.017	0.024	0.17	0.10	89	64	25

* 昭和 35 年 3 月 18 日 関西支部第 35 期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 37 年 10 月 1 日。

** 正員, 京都大学工学部。

*** 正員, 静岡大学工学部 (浜松市追分町 400)。

本論文では切削工具の摩耗曲線から摩耗の原因を考察し, 一般に使用されている削り速度に対する寿命方程式の適用できる限界を求めるものである。

2. 実 験 方 法

使用工具: 材種は国産セラミックス (かたさ H_{RA} 90, 抗折力 42 kg/mm^2) で, 工具形状は ASME 表示方式により (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 1.0) で示される。工具は超硬工具研削盤を用い, ダイヤモンドといし (#220 met.) により研磨した。

被削材: 0.44% 炭素鋼を用い, その成分, 性質を第1表に示す。素材は最大直径 180 mm, 長さ 700 mm の丸棒で, 直径が 40 mm になるまで切削した。

使用旋盤: 三菱エリコン高速旋盤でその要目は次のとおりである。

振り	450 mm
最大心間距離	1 000 mm
最大回転数	2 000 rpm
主電動機	15 HP
切削条件	切込み 1.0 mm
	送り 0.2, 0.315, 0.4 mm/rev
	削り速度 40~800 m/min

切削後, 逃げ面摩耗幅を工具顕微鏡, クレータ深さを大越式触針あらさ検査機により測定した。しかし本

実験の範囲ではクレータはかなり高速にならないと顕著でなく、またクレータにより寿命が左右されることはなかった。それゆえクレータ寿命についてはここでは触れない。

3. 損傷形態および寿命

セラミック工具の横逃げ面に現われる損傷の形態は、突発的な欠損は別として、長方形チップングと三角形チップングとがあげられる。そして時に刃先部の異常チップングと境界逃げ面摩耗とがこれに加わることがある。第 1 図は三角形チップングを生じた逃げ面を示す。このような損傷形態は、じん性が低いセラミック工具（抗折力 20 kg/mm^2 程度）において現われることが多い⁽¹⁾。三角形チップングは刃先において集中的に摩耗が進行したことを示すものであるから、一般に好ましくないものである。また長方形チップングの場合のように、摩耗量を平均摩耗帯幅をもって表わすことができず、先端摩耗幅で表わすことになり、前者の場合と同一に論ずることはできないであろう。

本実験における切削条件の範囲では、第 2 図のように主として長方形チップングが現われている。この摩耗形態が最も望ましいものであり、以下ではこの形態について解析する。

第 1 図 三角形チップング

第 2 図 長方形チップング

セラミック工具のようにかたさが温度に影響されにくい工具材料では、切削時間にともなう摩耗の増加分は摩擦しあう両材料が変質しない限り一定であると考えてよい。そこで長方形チップングを第 3 図のような模型で与えられるとすれば、その摩耗容積 W_1 は次式で与えられる。

$$W_1 = (V_B^2 l \cos \alpha \sin \alpha) / 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに V_B : 逃げ面平均摩耗幅 mm

α : 逃げ角 deg

l : 切削に参与する切刃の長さ mm

上式の意味は一定の切削条件のもとでは、逃げ面平均摩耗幅 V_B -切削時間 T 線図は時間軸を軸とする二次放物線であることである。たとえば送り 0.2 mm/rev , 削り速度 315 m/min (その他の条件は前述のとおり) においては第 4 図のように V_B^2 - T 線図は直線で示すことができる。

さて一般に寿命試験においては同一切削条件のもとでも、しばしば測定値に変動がある*。このばらつき

第 3 図 長方形チップングの模型

第 4 図 逃げ面摩耗と切削時間との関係

* これは本論文第 2 報において詳述する予定である。したがってこの行の説明は第 2 報を参考にされたい。

が寿命線図の折れ曲りに影響を与えることも考えられる。しかし結果はこれを加味してもなお寿命線図を各削り速度に対し1本の線でむすぶことができないので、原因は他にもあると考えられる。

送りをパラメータとし、 $V_B=0.2\text{ mm}$ を寿命点としたときの工具寿命線図を第5図に示す。この図から実用の削り速度範囲(100~300 m/min くらい)における寿命は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} VT^{0.62} &= 2530 \text{ (送り } 0.2 \text{ mm/rev)} \\ VT^{0.58} &= 855 \text{ (} \angle 0.315 \text{)} \\ VT^{0.60} &= 614 \text{ (} \angle 0.4 \text{)} \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

4. 比 摩 耗 量

切削試験においては工具と被削材との摩擦における摩擦を左右する因子が数多く含まれている。そこで各因子の影響をおのおの分離して比較することが望ましい。そして各条件に対して共通の因子を除去して本実験における変数—削り速度—による摩擦増加の原因を求める。

逃げ面における摩擦は凝着が比較的強い状態にあると考えられ、Holm⁽²⁾の凝着摩擦に関する実験式から、

第5図 セラミック工具の寿命線図

第6図 切削抵抗

$$W = \left(\frac{z}{H} \right) LN$$

ここに

W : 摩擦量, L : 摩擦距離

N : 垂直荷重

z : 接触した原子が相手に持ち去られる確率

H : 接触部におけるやわらかいほうの材料の平均流動圧力

をうる。上式において、ある定められた実験条件のもとでは z/H は温度のみの関数として表わしている。これを ω_s で表わし、なお摩擦面におけるせん断応力を τ_c 、摩擦面積を A とすると次のようになる。

$$W_2 = \omega_s \tau_c LA \dots\dots\dots (3)$$

ここに

W_2 : 摩擦の特性より考えられた摩擦量

そして(3)式中の ω_s を比摩擦量 (mm^2/kg) と呼んでいる。ところで同一の組合せによる摩擦面においては、 W_1 と W_2 は等しくあらねばならないから、(1)、(3)式を結合して

$$\omega_s = V_B^2 \sin \alpha \cos \alpha / 2 \tau_c LA \dots\dots\dots (4)$$

が求められる。

(4)式において未知数は摩擦面のせん断応力 τ_c のみである。ところで逃げ面にあたりを生じた場合、逃げ面のせん断応力は次のようにして求めることができる。すなわち主分力 F_c および背分力 F_t は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} F_c &= F_{c1} + F_{c2} \\ F_t &= F_{t1} + F_{t2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに $V_B=0$ ならば $F_c=F_{c1}$ 、 $F_t=F_{t1}$ であって、 F_{c2} および F_{t2} は逃げ面にあたりがあるときの切削抵抗の増加分を表わしている。したがって逃げ面におけるせん断応

力 τ_c は

$$\tau_c = F_{c2} / V_B b \dots\dots\dots (6)$$

で求められる。

ところで本実験に使用した工具は三次元工具であって、二次元の場合より複雑である。しかし有効すくい角が二次元の場合のすくい角の効果とよく一致しているといわれている。本実験では有効すくい角は -7° であるので、 -7° のすくい角をもつ二次元切削を行なって τ_c を求めた。結果は第6図のようになり、これより $\tau_c=50 \text{ kg/mm}^2$ を得、この値は削り速度に関係なくだいたい一定である。

この逃げ面のせん断応力を用い、各削り速度に対し比摩擦量を求めたものが第7図である。この曲線は速

度範囲によってその変化のようすが異なることがわかる。すなわち低速域と高速域で急激にその量が増大していることが指摘される。

5. 工具摩耗原因の理論的検討

セラミック工具材料は切削温度の範囲において、化学的に安定であり、また組織の変化が起るとは考えられない。そこで摩耗量増加の原因として次のものが考えられる。

(1) 構成刃先脱落による摩耗 比較的低速では工具の刃先に構成刃先がつき、これが脱落の際に工具材料の一部を持ち去ったり、あるいは脱落の衝撃で刃先を小さく欠損することが考えられる。

削り速度を増すと切削温度が上昇するため、構成刃先が生長しにくくなり、しだいにこの摩耗が減少し、構成刃先がなくなれば、この原因による摩耗は生じないものと考えられる。

(2) 機械的摩耗 すべり摩擦における機械的摩耗で、切削においてはいわゆるチップング摩耗と称するものである。この摩耗は温度が高いほど大きいと考えられるので、削り速度の増加とともに増大する。

(3) 高温溶着による転移 高温になると被削材の一部が工具材料内部に浸透して、その部分を弱め摩耗が進行する。この種の摩耗はセラミック材料では起りにくく⁽³⁾、ことに温度が比較的低い逃げ面においてはほとんど影響されないものと考えられる。

(4) 熱応力による破損 工具の刃先温度が工具材料の破損に影響を与える。すなわち切削中に過渡的な温度分布を生じ、このため材料内部に熱応力を生じて、これが材料の破断応力をこえるとき材料は割れを生じ、ついで破断する。

本実験のような連続形切りくずを生成する場合においては、このような熱応力は切込みあるいは切終りにおいて生ずる可能性があると考えられる。しかし切始めは高温の切りくず接触による熱伝導による加熱、切終りは空冷による自然冷却であるから、たとえセラミック材料が引張強さが非常に低いということを考慮しても、なお、切込みにおける影響のほうが大である。もちろん切終りの冷却も十分影響を与えるであろう。特に切込み時には機械的な応力も加わっている。

また一方一回で完全な破断を生じないとしても、熱応力によって割れを生じ、これがしだいに生長して、破断を起すものと考えられる。

以上の考察において、厳密な意味では摩耗の中に加えることができないものも含まれているが、純粋な摩耗のみを選択的にとり出すことは困難であるので、損傷を含む範囲まで拡大して考えることにする。

上述の考察からセラミック工具の寿命に関係する因子は (1)、(2) および (4) と考えられる。そこでこれら要素の削り速度による変化は定性的に第 8 図のように示すことができる。それゆえ第 7 図の実験結果を説明できる。この図から $V-T$ 線図の A、B 点を決定するものは構成刃先と熱応力であるから、次節において、これらの限界点を推定する。

6. 送り 0.2 mm/rev の場合 の摩耗曲線の解析

6.1 構成刃先の消滅限界 構成刃先の消滅する限界速度は、工具すくい面温度が被削材の再結晶温度に達したときの削り速度に相当すると考えられている。削り速度以外の要素が同一ならば、刃先への溶着物、あるいは構成刃先は仕上面あらさに大きな影響を与えるから、あらさ曲線から構成刃先の消失する限界速度を推定することができる。第 9 図はこれを示すもので、115 m/min が限界速度と考えられる。この速度が第 8 図 A 点に相当する。

このときの切削温度は Loewen および Shaw⁽⁴⁾ の理論的な計算式によりだいたい推定できる。平均すくい面温度 θ_s および平均せん断面温度 θ_{sc} は被削材母体の温度

第 7 図 比摩耗量の変化

第 8 図 摩耗原因の定性的表現

を θ_0 とすると,

$$\theta_s = \theta_0 + \frac{R_1 \tau_s \gamma}{J \rho_1 c_1} \dots\dots\dots (7)$$

$$\theta_e = \theta_s + \frac{0.377 R_2 \tau_r V r_c b}{J K_2 \sqrt{L_2}} \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。ここに,

R_1 : せん断面における発熱のうち切りくずにはいる熱の割合

R_2 : すくい面における発熱のうち切りくずにはいる熱の割合

ρ_1, c_1 : 被削材の密度および比熱 cal/g°C

K_2 : 切りくずの熱拡散率 cal/cm²

τ_s, γ : せん断面におけるせん断応力 kg/cm² およびひずみ

V : 削り速度 cm/s

J : 熱の仕事当量 g cm/cal

r_c : 切りくず比

τ_r : すくい面せん断応力 kg/cm²

b : 工具切りくず接触長さ cm

$L_2 = V r_c b / 4 K_2$

切削条件は切削幅 1.58 mm, 送り 0.2 mm/rev, 工

第9図 仕上面あらさと削り速度との関係

第10図 切削温度

具形状はすくい角 -7° , 逃げ角 5° の工具による二次元切削を行ない, (7), (8) 式に必要なデータを求め, 計算した結果が第10図である。これから削り速度 115 m/min では切削温度は約 620°C となり, 0.4%炭素鋼の再結晶温度 600°C に近い値となり, 前記推定の証明となる。

6.2 熱応力 高速側における限界線はセラミック材料の熱応力に対する強さによって定まる。

高削り速度においてはセラミック工具はしばしば逃げ面摩耗が本実験における寿命点 ($V_B = 0.2$ mm) に達する以前に, 材料の切始めにおいて欠損をおこす。これは被削材両端(切始めと終り)で生ずる熱応力が割れを生ずるためと考える。したがって高速側では寿命方程式で予期される寿命がえられないことが多いし, 寿命そのものの変動も多いことが観察される。前述したように切終りにおける冷却も熱応力を生じ, 割れ発生に影響を与えるが, 本実験の場合のように長時間切削をする場合には冷却の温度こう配は小であり, むしろ切始めの加熱における過渡的な温度分布の効果のほうが影響が大きいと考えられる。

セラミック材料は高温において諸性質が変化しないから, 加熱時において材料に生ずる最大熱応力は次式による。

$$2S_t = \frac{E\alpha(T_0 - T')}{(1-\nu)} \dots\dots\dots (9)$$

ここに,

T_0 : 初期温度 $^\circ\text{C}$

T' : 材料に与えられた温度 $^\circ\text{C}$

S_t : セラミックの引張強さ kg/mm²

$\Rightarrow$ 曲げ強さ/1.8* = 23 kg/mm²

ν : ポアソン比 = 0.25

E : 縦弾性係数 = 3.43×10^4 kg/mm²

α : 熱膨張係数 = 8×10^{-6} $1/^\circ\text{C}$

以上のデータから $\Delta T \equiv T_0 - T' = 126^\circ\text{C}$ が得られる。

他方工具材表面(すくい面)が切削における平均温度により一様に加熱されたとすれば, その内部の表面に対し直角方向に温度こう配を生ずる。この温度こう配は次式により与えられる⁽⁶⁾。

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = -\frac{q'}{K} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{kt}}\right) \dots\dots\dots (10)$$

ここに

$u(x, t)$: 温度関数

q' : すくい面に発生した熱量のうち工具にはいる

* 曲げ強さ S_b と引張強さ S_t の間には次式が成立する

$S_t/S_b = [1/\{2(m+1)\}]^{1/m}$

$m = 4.2^{(5)}$ であるから $S_t/S_b = 1.8$ となる。

熱量

 K : 熱伝導率 cal/cm s °C k : 熱拡散率 cal/cm² x : 工具表面よりの距離 cm t : 過渡時間 serfc(x): 余誤差関数

これらの諸数値⁽⁷⁾を代入し、 $\partial u/\partial x = \Delta T$ なる関係から q' が求められる。これから熱応力による破断を生ずる削り速度を知ることができる。この切削条件における q' は計算により⁽⁷⁾第 11 図のように与えられる。なおこの実験において、割れは表面より約 0.2 mm の位置より発生するので、 $x=0.2$ mm をもって計算した。

結果として限界削り速度は 600 m/min を得た。これが第 8 図 B に相当する。

ところでこの計算の妥当性は次の実験から証明できる。すなわち同一切削条件で、切込みのみを何回か繰返し、破損を生ずる切込み回数と削り速度の関係を求めれば、切込みの影響の著しくなる限界速度がえられる。結果は第 12 図となり 500 m/min をこえると著しく破損を生ずる回数は低くなる。この場合切込予定数は 10 回である。

第 11 図 q' の計算値

第 12 図 切込回数が工具破損におよぼす影響

6.3 総括 以上のごとくセラミック工具の実用削り速度 100~500 m/min の範囲において、寿命方程式が成立する上・下限界線はともに温度と密接な関係があることを知った。

(7), (8) 式において、 $K_1=K_2$, $\rho_1 c_1=\rho_2 c_2$, $\theta_0=\theta_0'$ とし、送りを t_1 , 工具と切りくずの摩擦係数を μ , すくい角を α とすると、

$$\bar{\theta}_t - \theta_0' = \frac{\tau_s}{J} \sqrt{\frac{V t_1}{k_2 \rho_2 c_2}} \left[A \mu \sqrt{\frac{t_1 \sec \alpha}{b}} + B \right] \quad \dots\dots\dots (11)$$

が得られる。上式で A, B は定数である。Loewen および Shaw⁽⁴⁾ は括弧の中の値は条件によらず一定であることを示し、 $\tau_s, \gamma, K_2, \rho_2, c_2$ は切削条件による変動が少ないと考えられるので、次のように示すことができる。

$$\bar{\theta}_t - \theta_0' = \sqrt{V t_1} \times \text{constant} \quad \dots\dots\dots (12)$$

また次のように変換できる。

$$V t_1 = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (13)$$

よって、送り 0.2 mm/rev の場合には前節の結果から

$$\left. \begin{array}{l} \text{溶着限界線 } V t_1 = 23 \\ \text{熱応力限界線 } V t_1 = 120 \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

がえられ、この式が他の送りにも適用しうことは第 13 図から明らかである。

7. 異種工具材料による検討

高速度鋼工具は内部結合力が強いので、接着した構成刃先が脱落する際に工具材料の一部を持ち去ること

第 13 図 寿命方程式の適用範囲

工 具	切込み mm	送り mm/rev	工 具 形 状	被削材	実験者
Sx, K103	0.5	0.28	0 0 5 5 15 15 0.2	S40C	著 者
C40	2	0.2	0 6 4 4 30 30 1.0	S60C	Heymel
D25	2	0.2	"	"	"

第 14 図 各種工具材料への寿命線図

は少ない。また削り速度が高くなり、切削温度が上昇すると、熱による破断を起す以前に軟化温度に達し、いわゆる白輝帯現象を示す。したがって高速度鋼工具において寿命方程式が最も広い範囲にわたって成立する。

超硬工具は成分(WC, TiC, TaC, Co など)の多少によって内部結合力が変動するから一概に結論は出せない。しかし抗折力が最小のものでもセラミック材料の2倍以上あるから、熱応力に対し強いと考えられる。また内部結合力が大きいから構成刃先の脱落による摩耗も少ないと考えられるので、その他の原因(たとえば酸化)が無視しうるものとするならば、セラミック工具よりはるかに広い範囲にわたって寿命方程

式が成立しうるであろう。

本実験に用いた以外のセラミック材料でも、第14図⁽⁸⁾のようにやはり低速および高速域で折れ曲る。またじん性の高い(抗折力約 50 kg/mm²)セラミック工具のほうが成立範囲がいくぶん広いように考えられる。性能の劣るセラミック工具 Sx (抗折力 30 kg/mm²)、および K 103 (抗折力 20 kg/mm²)などは総じて寿命が低く、また高速側の限界速度が低くなる。

8. 結 言

以上セラミック工具に対し実用しうる削り速度域における寿命方程式の成立する範囲を理論的に考察し、あわせて成立限界を求めた。この結果、低速においては圧着物脱落による切刃の欠損、高速においては熱衝撃による破損が主原因であることが示された。特にセラミック工具のようにもろい材料に対してはこの傾向が顕著である。

もちろん解析においては多くの仮定を含み、必ずしも完全なものといえないが、セラミック工具を実用化する上での一つの資料となるものと思う。

文 献

- (1) 奥島・藤井, 機械学会論文集, 24-146 (昭 33-10), 681.
- (2) R. Holm, *Electric Contacts*, (1946), Hugo Gebers Forlag, Sweden.
- (3) 奥島・藤井, 機械学会論文集, 26-163 (昭 35-3), 418.
- (4) E.G. Loewen & M.C. Shaw, *Trans. ASME*, 76 (1954), 217.
- (5) 奥島・藤井, 精密機械, 16-1, (昭 35-1), 15.
- (6) R.V. Churchill, *Modern Operational Mathematics in Engineering*, (1944) Chapt. 4, McGraw-Hill.
- (7) 奥島・藤井・奥窪・丸岡, 関西支部第 36 期定時総会講演会前刷, 講演番号 413 (昭36-3-17), 49.
- (8) C. Agte, R. Kohlermann, u. E. Heymel, *Schneidkeramik*, (1959), 157, Akademie-Verlag.

37年の工作機械の輸出入実績

日本工作機械工業会では、このほど昭和 37 年の工作機械輸出入実績をまとめた。

それによると輸入は 475億 7000 万円で、前年の 389 億 9 000 万円に比べて 22% の大幅増で、戦後最高を記録した。これに対して輸出は 25億 8 800 万円と前年の 24 億 3 400 万円に比べて 7 % 増にとどまっている。

詳細はつぎのとおり。(単位千円、括弧内は台数)

〔輸入〕

▽旋盤=11 305 709 (1 439) ▽ボール盤=502 616 (305) ▽中ぐり盤=7 433 016 (522) ▽フライス盤=6 560 786 (938) ▽平削り盤=3 413 806 (109) ▽

研削盤=8 884 480 (1 720) ▽歯車仕上機械=6 431 666 (2 132) ▽その他=3 040 132 (1 219) ▽計=47 572 21 (8 384)

〔輸出〕

▽旋盤=801 939 (812) ▽ボール盤=214 468 (6 393) ▽中ぐり盤=302 292 (371) ▽フライス盤=390 388 (187) ▽平削り盤=31 883 (35) ▽研削盤=476 037 (4 584) ▽歯車仕上機械=69 115 (67) ▽その他=301 796 (91 788) ▽計=2 587 919 (14 237) (服部敏夫)