切刃チップング現象の確率的表示

井 川 直 哉* 安 木 国 晴**

A PROBABILISTIC APPROACH TO CUTTING EDGE CHIPPING

By Naoya Ikawa and Kuniharu Yasugi

A probabilistic method is proposed for the prediction of cutting edge chipping produced by purely mechanical load. It shows the possible sites for the chipping to take place at a certain level of probability. The contour map for the probability of chipping can be obtained by comparing the distribution of the principal stresses in a cutting edge with the statistical fracture criteria for sintered carbide as a tool material. For a particular set of cutting conditions, the aspect of the chipping observed in the orthogonal cutting test at low speed can be predicted fairly well by the contour map for the probability. It is shown quantitatively by these theoretical and experimental analyses that the extent of the chipping increases with increase in the rake and the clearance angles and is affected significantly by the condition of the tool engagement with the workpiece.

1. 緒 言

切削工具切刃のチップング現象の解明とその制御は切削加工におけるいわば古典的な問題であるが、それが内包する要因の複雑さの故に、従来どちらかといえば現象論的取扱いにたよらざるを得なかった。しかし最近のように信頼性の高い工具が要求されるようになると、その製造法や使用法についての指導原理を確立するためには、工具損耗を支配する基本現象の解明が、たとえそれが実用的観点からやや離れたとしても、従来にもまして重要になってくる。

工具切刃のチップングあるいは欠損*** はさまざまな現象の複合作用の結果生じるものと考えられるが、直感的には工具刃先内に発生する応力と、それによって工具材料に破壊が起るかどうかという刃先強度との関係がきめ手になると考えられる。このような観点から、これまでに筆者らを含めて、工具刃先内の応力についていくつかの解析がなされてきた^{1)~6)}。一方、工具材料、特に超硬合金の破壊については、これまで材料科学的立場からの研究はかなり多くみられてきた⁷⁾とはいえ、そのクライテリアについてはほとんど情報が得られていなかったのではあるが、比較的最近になって筆者らによって、刃先の破壊を想定した強度試験にもとづき、統計的性質、寸法

効果及び動的効果をふくめたものが提唱された⁸⁾。

本研究は、筆者らによる工具刃先内応力分布の解析結果^{4), 5)}と、超硬合金の破壊に関する統計的クライテリア⁸⁾を対比することにより、機械的負荷による工具刃先の破壊を、現象発生等の確率線図という形で表現しようと試みるものであり、基本的には、工具の信頼性の数量的表示につながるものである。本報では、チップング現象の確率的表示の手順をのべ、その手法を二次元切削におけるチップング現象に適用し、実験による観察結果と対比させながら工具形状や切削条件の影響を考察しようとする。

2. チップングの発生確率

切刃内部の応力分布が推定できると、ある応力状態にさらされている点または微小領域での破壊の可能性は、その状態と工具材料の応力からみた破壊のクライテリアとの対比によって知ることができる。このときクライテリアが統計的なものであるならば、破壊の発生確率という形で知ることができる。

切刃内部の応力分布は、切削力をもとにして、電算機を用いる数値計算によって、たとえば図1⁴⁾のように求めることができる。また二次元応力下での超硬合金の破壊のクライテリアについては、鋳鉄のように脆い金属に対してFisherによって提案された決定論的な条件⁹⁾と、統計的なWeibullの破壊理論¹⁰⁾を組合せることにより図2に示すものが得られている⁸⁾。その意味は次のようである。

材料内のある一点（または微小領域）における主応力を $\sigma_1, \sigma_2 (\sigma_1 > \sigma_2)$ とし、その点の破壊の確率をきめる量

* 正会員 大阪大学工学部（吹田市山田上）

** 正会員 大阪大学工学部（現・光洋精工㈱；柏原市国分東条町24-1）

*** ここでは厳密な区別をせず、切込程度以下の寸法の刃先破壊をチップング、それを越える大きなものを欠損とよぶことにする。

図1 工具内主応力分布の1例
(τ_0 :被削材のせん断強さ50kg/mm²)

表1 組合せ応力状態におけるワイブルパラメータ
($k=3.5, V=V_0=1\text{mm}^3$)

応力状態	$\tan^{-1}(\sigma_2/\sigma_1)$	m^*	σ_u^* kg/mm ²	σ_R^* kg/mm ²	σ_V^* kg/mm ²
引張・引張	0~45°	3.3	140	22.8	154
単軸引張	0	3.3	140	22.8	154
	15°	3.7	134	28.6	153
	30°	4.2	137	35.6	163
引張・圧縮	40°	4.8	151	46.1	187
	60°	5.5	183	63.8	236
	75°	6.4	257	94.1	339
単軸圧縮	90°	9.8	508	55.1	561
	105°	9.8	594	56.3	648
圧縮・圧縮	120°	9.8	694	53.4	745
	135°	9.8	745	50.0	794

図2 超硬合金の破壊についての統計的クライテリアの図的表示

として応力特性値 $\sigma^* = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ ($\sigma_1, \sigma_2 > 0$ 以外のとき), $\sigma^* = \sigma_1$ ($\sigma_1, \sigma_2 \geq 0$ のとき) を考える。対象とする工具材料の破壊発生時の破壊起点の応力特性値 σ^* は Weibull 分布にしたがうものとし、その閾値 σ_u^* , メディアン σ_R^* , それに破壊確率 $S=1$ になる σ^* をそれぞれつらねたものが曲線 U, R, V である (但し σ_1/σ_2 の大きさは材料の単軸圧縮強度 σ_c により正規化して表示してある) (付録)。曲線 U 上または内側の応力状態にある材料の破壊確率は 0, R 上の上は 1/2, V 上またはその外側のそれは 1 である。U, R, V の性質は主応力の三種の組合せ $[\sigma_1, \sigma_2 > 0]$, $[\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0]$, $[\sigma_1, \sigma_2 < 0]$ によって異なるが、それぞれ単軸引張り・圧縮試験における Weibull パラメータを用いてあらわすことができる。なお、ある一定応力比を保った強度試験 (図 2 では、O-a, O-b, O-c 線上で σ^* が変化する) を想定するとき、 σ^* からみた累積強度分布 (ある σ^* での破壊確率) が $[\sigma_1, \sigma_2 > 0]$ に対し S_1 , $[\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0]$ に対し S_2 , $[\sigma_1, \sigma_2 < 0]$ に対し S_3 のように示される。この二軸応力下での Weibull パラメータ $\sigma_u^*, \sigma_R^*, m^*$ は単軸応力下でのパラメータから求められ (付録), 表 1 に一例が示されている。

工具内各点の応力値は、具体的には適当な大きさ (一辺約 $4\text{ }\mu\text{m}$ または $10\text{ }\mu\text{m}$ の扇形及び三角形) に分割された微小要素にかかる平均応力として計算され、その場合の主応力 σ_1, σ_2 がわかると、図 2 または以下に示す諸式を用いてその要素の破壊の確率 S_i が求まる。 S_i は Weibull の破壊理論により次のように表わされる。

$$S_i = 1 - e^{-B_i} \quad (1)$$

$$B_i = \frac{V_i}{V_0} \left(\frac{\sigma^* - \sigma_u^*}{\sigma_0^*} \right)^{m^*}$$

ここに、 B_i は i なる微小要素の破壊の危険度、 V_i は同要素の体積、 V_0 は物理的には破壊に関与する欠陥を 1 個程度含む微小な一定体積、 m^* は工具材料の均一性をあらわす常数、 σ_0^* は別の材料常数 (但し V_0 に関係する) である。また添字 i は i 番目の微小要素を示し、分割個数 n だけある。

** 本報では $V_0 = 1\text{mm}^3$ とした。Weibull 理論では、数理的には V_0 の値は任意の大ききでよい (これに応じて他のパラメータ σ_0^* がきめられるので) が、大部分の取扱いで暗黙のうちに単位体積 (たとえば 1mm^3) を採用している。超硬合金の場合、 $V_0 = 1\text{mm}^3$ は物理的にもそれほど非現実的ではないことが、破壊の起源に関する研究 (鈴木ほか: 日本金属学会誌, 38 (1974), 1013) などから類推できる。

図3 チッピングの確率的表示法の流れ

表2 切削試験の条件

工具材質: K20, すくい角 = $-10^{\circ} \sim 40^{\circ}$, にげ角 = $3^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 被削材: SCM3 (せん断強さ $\tau_0 = 50 \text{ kg/mm}^2$, $H_V = 417$), 切削幅 = 3.3 mm, 切込み = 0.1 ~ 0.35 mm, エンゲージ角 = $-30^{\circ} \sim 100^{\circ}$, 切削速度 = 25 mm/min, 切削距離 = 15 mm, 切削液: なし

各微小要素について S ($i = 1 \sim n$) が求められるとそれらの中で等しい確率をもつ微小要素を連ねて等確率線図を画くと, ある確率で, どのような範囲に破壊が起りそうであるかがわかる (以下に示す図5, 9, 11)。但し, その範囲は, 破壊の起点についての情報を示すもので, 最終的な破壊の形——チップの形——を必ずしも直接示すものでないと思えるべきである。なぜならチップの形をきめるのは, 破壊の起点もさることながら, 破壊あるいはクラックの伝播経路であり, さらにそれをきめるものはおそらくはクラックの進展にともなって再分布する応力状態であるのに, 上の取扱いではそれを考慮していないからである。

一方, 工具内のどこかで破壊が発生する確率 S_T は次式で求めることができる。

$$S_T = 1 - e^{-B_T} \quad (2)$$

$$B_T = \frac{1}{V_0} \int_V \left(\frac{\sigma^* - \sigma_u^*}{\sigma_o^*} \right)^{m^*} dV$$

そこでチップ現象の確率的表示の手順は全体として図3のような流れになる。本報告では結果の表現は等確率線図によることにする。

図4 すくい角とチップの大きさの関係 (にげ角 $r = 15^{\circ}$, 切込み $t = 0.2 \text{ mm}$)

3. チッピングのモデル実験

解析の妥当性を確認する目的で表2に示すような条件で二次元切削⁴を行なった。その結果発生するチップの規模は, すくい面, 逃げ面の拡大写真をもとに, 工具面上における欠けの終端の刃先からの距離 λ (これをここではチップの大きさとよぶことにする) であらわす。 λ はいうまでもなく切刃の幅方向の各点で異なるが 100 μm 間隔で約 30 個の測定値から算術平均値 λ_{p2} , 標準偏差 $\mu_{1,2}$ を算出した。なおこの場合の添字 1 はすくい面, 2 は逃げ面上の値を意味する。欠けの工具面からの深さは測定しなかった。

切削実験においてチップが発生すると切削力に急激な変化が生じるので, これを工具ホルダに装置した加速度ピックアップからのパルス状信号によって検知し, 直ちに切削を中止して刃先の状況を観察した。理論解析の入力としての切削力の値は, このパルス信号発生直前のものを用いた。

4. 切刃の形状とチップング

4.1 すくい角の影響

図4はモデル実験におけるチップの大きさに対するすくい角 α の影響を示すものである。また図5(a)(b)(c)は $\alpha = 0^{\circ}, 10^{\circ}$ 及び 20° の工具に図中にそれぞれ示す切削力がかかった場合の等確率線図である。この等確率線図

図5 チップングの発生確率(等確率線図)と工具形状の関係(切込 $l = 0.2$ mm, F_t : 単位切削幅当り主分力, F_n : 単位切削幅当り背分力, ℓ : 切くず接触長さ)

図6 チップングの発生領域と確率

とすくい面(または逃げ面)でかこまれる領域は、その確率以上でチップング発生の可能性のある領域(簡単のためこれを発生領域とよぶことにする)である。さきにもふれたように、発生領域の面積 A は、チップングの規模を直接示すものではないが、両者には何等かの対応があるはずと考えてもよいであろう。そこで A と確率との関係をすくい面角 α をパラメータとして示したのが図6である。

これらを通観すると $\alpha = -10^\circ \sim +20^\circ$ の範囲では、 α が大きくなるにつれてチップングの大きさ並びにある一定の確率(とくに高い確率のレベル)をもつ発生領域の面積 A も徐々に大きくなっており、実験と理論とがおおむねよく一致していることがわかる。すくい面で観察されたチップングの大きさ λ_1 と理論的に予測される発生確率の大体的な関係は、 $\bar{\lambda}_1 + 3\mu_1$ が30~40%、 $\bar{\lambda}_1 + \mu_1$

図7 逃げ角とチップングの関係(すくい面 $\alpha = 20^\circ$)

図8 切込みとチップングの関係 ($\alpha = 20^\circ$, $r = 15^\circ$)

がほぼ95%、 $\bar{\lambda}_1$ がほぼ100%にそれぞれ対応しているようである。しかし逃げ面上で観察されたチップングの大きさ λ_2 と理論的予測とはほとんど一致しない。その理由はおそらく、逃げ面側でのチップングは、すくい面側でのチップングによって刃先強度が低下した結果発生するためであろうと考えられる。

なお $\alpha \geq 30^\circ$ (この場合くさび角 δ は 45° より小になる)では、工具のエンゲージの際に大きな刃先欠損を生じ、またその際の切削力から刃先内部の応力分布を推定するのは不適当と思われたので解析の対象にはしなかった。

4.2 逃げ角の影響

図7はモデル実験におけるチップングの大きさと逃げ角の関係である。また逃げ角 r が 15° 及び 3° の場合(ただし $\alpha = 20^\circ$)についての等確率線図が図5(c)及び(d)に示されている。逃げ角の影響についても実験と理論は傾向的に一致している。観察されたチップングの大きさと理

図9 チッピングの発生確率と切込みの関係($\alpha = 20^\circ$, $r = 15^\circ$, $t = 0.2 \text{ mm}$ については図5(c)参照)

図10 エンゲージ角とチッピングの関係 ($\alpha = 20^\circ$, $r = 15^\circ$, $t = 0.2 \text{ mm}$)

論的発生確率のおおよその関係は, $\bar{\lambda}_1 + 3\mu_1$ が確率50%~60%に, $\bar{\lambda}_1 + \mu_1$ が約90%程度に, $\bar{\lambda}_1$ がほぼ100%にそれぞれ対応しているようであり, すくい角の影響の場合と大体似ている。

また逃げ角が大きくなり, くさび角が50°程度になると極めて大きな欠損が観察されたことも, すくい角が大きくなった場合の例とよく似ている。

5. 切削条件とチッピング

5.1 切込の影響

図8はモデル実験で観察されたチッピングの大きさ $\bar{\lambda}_1$, $\bar{\lambda}_2$ と切込 t の関係を示すもので, t の増加によってほぼ単調に $\bar{\lambda}$ が大きくなっている。モデル実験では $t \leq 0.25 \text{ mm}$ ではほぼ連続型の切屑排出が行なわれているが, $t \geq 0.3 \text{ mm}$ ではそれが不連続型となり切削機構に遷移がみとめられた。したがって $t \approx 0.3 \text{ mm}$ を境界としてそれ以上とそれ以下とでは, 主分力, 背分力をもとにして工具面上の応力分布を推定する上に若干の差異を考えるべきではあるが, ここではそれを無視して $t = 0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ の場

図11 エンゲージ条件とチッピングの発生確率 ($\alpha = 20^\circ$, $r = 15^\circ$, $t = 0.2 \text{ mm}$)

について単純に求めた等確率線図を示すと図9(a)(b)及び図5(c)($t = 0.2 \text{ mm}$ の場合)のようである。

観察されたチッピングの大きさと理論的に予測される発生確率の対応は, 切込による微妙な切削機構の変化のためか工具形状の影響を解析した場合はよくはないが, やはり傾向的には一致している。

5.2 工具エンゲージ状態の影響

切刃チッピングに対して切削の初期状態が微妙に影響を与えることは直感的にも理解できるし, また実験的にもその重要性が指摘されてきた¹¹⁾¹²⁾。そこで $\alpha = 20^\circ$, $r = 15^\circ$ の工具によってエンゲージ角 ϵ (図10参照)が -30° から 100° にわたるいくつかの条件で切削を行ないチッピングの大きさ λ と ϵ の関係を求めた結果が図10に示されている。 λ_1, λ_2 は $\epsilon \leq -30^\circ$ で極めて大きく, また $\epsilon \neq 40^\circ$ でも極大値を示すが, $\epsilon = -20^\circ \sim 0^\circ$ と, $\epsilon \geq 80^\circ$ では比較的小さい。

一方それぞれの代表的な条件である $\epsilon = -30^\circ, 0^\circ, 40^\circ, 80^\circ$ について, チッピングを起した時点での切削力 F^* をもとにした破壊の等確率線図を求めると図11のようになり, それらの大小関係は実験とよく一致している。

6. 結 論

切削中の工具刃先において, 力学的負荷のみによって

* 各場合の工具面上の応力分布の推定—特に逃げ面の接触状態の取扱い—などは顕微鏡映画をもとに行なった。

発生する破損の予知を目的とする一試みを行なった。結果を要約すると次のようである。

1) 実験的に求めた切削力をもとにして弾性論的に推定した工具内応力分布と、別に実験的に求めた超硬合金の破壊に関する統計的クライテリアとを対比することにより、チップングの発生確率、あるいは或る確率で予期されるチップングの規模がある程度定量的に推定しうることがわかった。

2) 上の半理論解析と、それに対応する二次元低速切削実験において観察されるチップングとを比較すると次のことがいえる。

(a) すくい角、逃げ角が増すにつれてチップングの大きさは大きくなる。その模様はある程度予知可能である。

(b) 切込みが増加していく場合、切くず排出からみた切削機構に大きな変化がなければ、チップングの大きさは徐々に大きくなる。

(c) すくい角 20°, 逃げ角 15° の工具での実験によれば、エンゲージ角 -30° 以下と 40° 近辺の場合にチップングの大きさは異常に大きくなる。この状況は半理論的に予知可能である。

終りに、研究の遂行にあたり御指導いただいた大阪大学・田中義信名誉教授、牧之内三郎教授に深く感謝するとともに、実験材料の面で種々御配慮いただいた住友電気工業炭粉末合金事業部の方々に厚く御礼申し上げる次第である。(原稿受付：昭和51年2月6日)

付 録

鋳鉄のような材料についてFisherによって提案された破壊のクライテリアは二軸応力状態（主応力を σ_1, σ_2 かつ $\sigma_1 > \sigma_2$ とする）では次式で示される。

$$\sigma_1, \sigma_2 > 0 \cdots \cdots k\sigma_1 = \sigma_c \quad (a)$$

$$\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0 \cdots \cdots (k\sigma_1)^2 - (k\sigma_1\sigma_2) + \sigma_2^2 = \sigma_c^2 \quad (b)$$

$$\sigma_1, \sigma_2 < 0 \cdots \cdots \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_c^2 \quad (c)$$

ここに、 σ_c は単軸圧縮強度、 k は応力集中係数で（単軸圧縮強度/単軸引張り強度）として求められる。これらの式は σ_1, σ_2 の直角座標上で、(a) は σ_2 軸に平行な直線、(b) は主軸を $\tan^{-1}(k/1 - k^2)/2$ だけ、また(c) は 45° 傾けた楕円の一部分でそれぞれあらわされる。

一方、強度が統計的にはワイブル分布するとして、単軸圧縮強度のメディアンを σ_{Rc} 、閾値を σ_{uc} とするとき、組合せ応力下で破壊発生時の応力特性値 $\sigma^* = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ の分布におけるメディアン σ_{R^*} 、閾値 σ_{u^*} は、式(a), (b), (c)において σ_c を σ_{Rc} または σ_{uc} にそれぞれおきかえて得られる関係をもって、主応力比 (σ_2/σ_1) につれて変化

すると考える。前者が曲線 R に、後者が曲線 U に相当する。

また二軸応力下では Weibull パラメータ m^* は次式で示すごとく主応力比とともに変化すると考える。

$$\sigma_1, \sigma_2 > 0 \cdots \cdots m^* = m_t \quad (a)$$

$$\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0 \cdots \cdots m^* = m_t + (m_c - m_t)(1 - e^{\sigma_2/\sigma_1}) \quad (b)$$

$$\sigma_1, \sigma_2 < 0 \cdots \cdots m^* = m_c \quad (c)$$

以上の手順により単軸強度試験の結果を用いて、二軸応力下での破壊のクライテリアを求めることができる。

更に、上のクライテリアは試料の寸法に応じて変化させなければならない。本研究で対象とした超硬合金 K20 の平均引張り強度がワイブル分布のメディアン σ_{Rt} に等しいと考えると、それは四点曲げ試験⁸⁾をもとにして実験式(d)であらわされる。

$$\sigma_{Rt} \text{ (kg/mm}^2\text{)} = \exp(-0.0825 \ln V + \ln 154) \quad (d)$$

ここに V は単軸引張り試験片の体積 (mm³) である。

しかし閾値 σ_{ut} はほぼ一定とみなす方が適当と考えられた。

したがって、破壊確率を求めようとする要素の体積によって σ_{Rt} は式(d)に示されるように変化し、それにともない他のワイブルパラメータ σ_{ot} も変化することになる。但し圧縮強度については寸法効果を考慮していない。なお、 $\sigma_R, \sigma_u, \sigma_o$ の関係は次式で示される。

$$\sigma_R = \sigma_u + \sigma_o \left\{ \frac{V_o}{V} (\ln 2) \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (e)$$

参 考 文 献

- 1) F.R. Archibald: Analysis of the Stress in a Cutting Edge, Trans. ASME, 78, 6 (1956) 1149.
- 2) А. И. Бетанели: К исследованию прочности режущей части инструмента, Бестник машиностроения, 2 (1964) 50.
- 3) 益田和昭: WC 系超硬切削刃の圧壊強さ, 日本機械学会論文集, 35, 274 (1969) 1338.
- 4) Y. Tanaka, N. Ikawa and K. Yasugi: An Approach to Cutting Edge Chipping by Stress Analysis, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., 6, 1 (1972) 1.
- 5) 田中義信, 井川直哉, 安木国晴: 工具刃先における応力分布, 切削工具のチップングに関する基礎研究(第1報), 精密機械, 39, 10 (1973) 1055.
- 6) В. А. Остафьев: Расчет прочности режущей части инструмента, Станки и инструмент, 43, 7 (1972) 30.
- 7) たとえば展望, 原昭夫: 超硬合金工具材料の破壊, 精密機械, 39, 11 (1973) 1105.
- 8) Y. Tanaka, N. Ikawa and K. Yasugi: Proc. ICPE, Tokyo (1974) Part 1, 590.
- 9) J. C. Fisher: A Criterion for the Failure of Cast Iron, ASTM Bulletin, No. 181 (1952) 74.
- 10) W. Weibull: A Statistical Theory of the Strength of Materials, Ing. Vetenskaps Akad. Handl. Nr 151 (1939),

- A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, *J. Appl. Mech.*, **18** (1951) 293.
- 11) M. Kronenberg : Analysis of Initial Contact of Milling Cutter and Work in Relation to Tool Life, *Trans. ASME*, **68**, 3 (1946) 217.
- 12) H. Opitz and H. Beckhaus : Influence of Initial Contact on Tool Life when Face Milling High Strength Materials, *Ann. CIRP*, **18**, 2 (1970) 257.
-