621.641.1.014.4:621.941.1-493

鋼切削における切りくずの挙動について*

(第2報, 平行形チップブレイカの場合)

奥島啓式**, 星鉄太郎***, 藤縄孝****

On the Behaviour of Chip at Steel Cutting
(Part 2, In the Case of Parallel Type Chip Breaker)by keiji OKUSHIMA, Tetsutaro HOSHI,
and Takashi FUJINAWA

This paper describes the behaviour of chip at steel cutting by lathe tools with parallel-type chip breakers, which is a most fundamental type of chip breakers. The first half describes the curling radius of chip bent by chip breakers. We introduce here our new equation about the curling radius. The latter half describes the chip breaking action of chip breakers. Using the above equation of curling radius, we succeeded in an equational representation of the conditions, in which chip is properly broken. On the basis of this equational representation, a monograph was drawn up for the design of chip breakers.

1. 緒 言

チップブレイカに関する研究の一環として, すでに前報⁽¹⁾においてチップブレイカのない工具によるときの切りくずの挙動について述べた. 本論文は平行形チップブレイカをつけた工具で鋼を削ったときの切りくずの挙動について述べるものである.

切りくずの形は切削条件とチップブレイカの寸法によって変化するばかりでなく, 被削材あるいは工具の形状によっても変化する. 本論文は被削材と工具の形状とは一定として, 切削条件とチップブレイカの寸法の組合せによって切りくずの形がいかに変化するかを述べ, さらに最適のチップブレイカの設計方針について述べるものである.

2. 実験装置および材料

実験は丸棒の外径削り三次元乾切削で行った. 実験に用いた旋盤は新潟鉄工所製 45 SD 高速ならい旋盤で, そのおもな要目は次のとおりである.

振 り 500 mm, 心間最大長さ 1100 mm,

回転数 23~1750 rpm, 主電動機 15HP,

被削材は長さ 360 mm, 直径 75~180 mm の丸棒で

その成分および機械的性質を第1表に示す.

工具は第1図のごとく JIS 33 形(右勝手)バイトに平行形チップブレイカをダイヤモンドホイールでと

第1表 被削材の成分および機械的性質

成 分 %							降 伏 点	引 張 強 さ
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	kg/mm ²	kg/mm ²
0.38	0.29	0.53	0.21	0.014	0.14	0.14	54	74

$W=0.6\sim3.1$ mm

$h=0.2\sim0.6$ mm

$R=0.6$ mm

第1図 平行形チップブレイカをつけた JIS 33 形バイト

* 昭和 34 年 3 月 18 日 関西支部第 204 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 34 年 5 月 29 日.

** 正員, 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町).

*** 准員, 京都大学工学部.

**** 准員, 汽車製造会社.

ぎつけたもので、材質は S1 である。工具の刃先径 r は原則として 1 mm で、特にチップブレーカの幅がせまいときには 0.3 mm とした。

3. 切りくず形態の分類

鋼切削において生成する切りくずを、外観的な形態によって分類する。チップブレーカをつけない工具によって生ずる切りくずは前報⁽¹⁾のとおり第 2 図の左から連続切りくず I~V の 5 種、分断切りくず I'~III' の 5 種の合計 10 種の形態に分類される。チップブレーカをつけた工具の場合には上記の形態のほかに第 2 図に VI, VI_a, VI_b, VI_c と示す形態の切りくずが生ずる。これらは外面のなめらかなつる巻状の切りくずで、もしチップブレーカがなければ I 形となって真直ぐに流出すべき切りくずがチップブレーカによって曲げられて生ずるものである。このような外面のなめらかなつる巻状切りくずが連続したものを VI 形、数巻きごとにふり切れたものを VI_a 形、さらにそれが工具のシャンクなどにつき当って一卷きごとに分断したものを VI_b 形、半巻きごとに分断したものを VI_c 形とそれぞれ名づけた。あるいはもしチップブレーカがなければ、III 形となるべき切りくずがチップブレーカによって曲げられる場合もあり、このときは III 形と VI 形の間形態の切りくずが生ずる。それが連続して流出したり数巻きごとにふり切れたり、一卷きまたは半巻きで分断したりすることは、III 形あるいは VI 形の切りくずと同様である。

切りくず処理の難易の点から見ると I 形, II 形および II' 形が最も危険であり, III 形, IV 形および V 形がそれに次いでいる。チップブレーカのない工具で作業する場合に、このような切りくずが生じて困るときには切削条件を適当に変えることによって困難が除かれる場合が多い。第 3 図はチップブレーカのない工具で実験した結果を示すもので、実線はそれぞれの切込みのときに、処理の困難な切りくずが生ずる場合と処理の容易な分断切りくずが生ずる場合との切削条件の境界線を示している。境界線より右側が処理困難な切りくずを生ずる範囲、左側が分断切りくずを生ずる範囲である。この図からわかるように、処理の困難な切りくずが生ずるときには切込みを小さくするか、送りを大きくするか、あるいは削り速度を小さくすればよい。

第 2 図 切りくず形態一覽表

そのような切削条件の変更が許されないときには、適当なチップブレーカをつけた工具を用いなければならない。チップブレーカはそれによって切りくずが曲げられるようにつけることはいうまでもないが、曲げられた切りくずが連続してVI形になるときは、やはり処理が困難である。したがって特にVI形の切りくずが望まれる場合のほかは、分断切りくずを生ずるようにチップブレーカの寸法を定めねばならない。VI_a'形あるいはVI_b'形の切りくずを得るのがチップブレーカとして最適である。さらにこまかく半巻きごとに分断したVI_b'形を生ずるときには分断が激し過ぎる傾向があり、特有の騒音を発し、ときには振動を生じたり工具の破損をきたしたりする。このことから一般にVI_b'形の切りくずのみを生ずるときはチップブレーカ性能過剰として警戒せねばならない。

4. チップブレーカによる切りくずの曲げ作用

チップブレーカによる切りくずの分断は、チップブレーカが切りくずを曲げる作用と密接な関係がある。まずここではチップブレーカが切りくずを曲げる作用だけを考える。

(i) チップブレーカによる切りくずの曲げの理論的考察 チップブレーカによって曲げられた切りく

第3図 切りくず処理難易の境界線

第4図 材料の応力ひずみ線図

ずの曲率半径について Henriksen⁽²⁾ は幾何学的に説明し、いわゆる Copenhagen 式をあげているが、これによっては切りくずの曲率半径はチップブレーカの寸法のみにより定まり、送りの影響などを説明することができない。ここではチップブレーカにより切りくずが曲げられるようすを塑性力学的に取扱うこととし、次の仮定をおく。

- 1) 切りくずの材料は加工硬化のないものとする。すなわち引張圧縮においてひずみと応力の関係が第4図のごとくなるものとする。
- 2) もしチップブレーカがなければ切りくずは工具のすくい面に沿って真直ぐに流出するものとする。
- 3) 変形前に平面であった切りくずの断面は変形後も平面であるとし、また中立層は切りくずの厚さの中央にあるものとする。
- 4) チップブレーカの角から切りくずに働く力は第5図に P として示すごとくで、その力によって切りくずに生ずる曲げモーメントの大きさ M は、刃先点から測った切りくずの長さ s に対して第6図のごとく直線的に分布しているものとする。

切りくずを長方形断面の「はり」と考えると、切りくずの横断面内任意の点の垂直応力を σ とするときの曲げモーメントの大きさは

$$M = b \int_{-e}^e \sigma \eta d\eta \quad (b: \text{切りくずの幅})$$

である。いま切りくずの横断面の最外層が塑性状態に

第5図 切りくずの曲げ変形の説明図

第6図 曲げモーメントの分布図

達するときの曲げモーメントを M_e とすると, これは上の式において $\sigma = \sigma_e \cdot \eta / e$ とおいて次のようになる.

$$M_e = b \int_{-e}^e \frac{\sigma_e}{e} \eta^2 d\eta = \frac{2}{3} b \sigma_e e^2 = \frac{\sigma_e}{e} I$$

(I : 切りくずの断面二次モーメント)

また切りくずの横断面全部が塑性状態に達したものとすると, そのときの曲げモーメントは次のようになる.

$$M = 2b \int_0^e \sigma_e \eta d\eta = b \sigma_e e^2 = \frac{3}{2} \frac{\sigma_e}{e} I = 1.5 M_e$$

したがって切りくずが $1.5 M_e$ の曲げモーメントを受けるときには, 曲げ変形は時間とともに増大し, 切りくずを任意の曲率半径にまで曲げることができる. しかしそれは切りくずが十分に長い時間 $1.5 M_e$ の曲げモーメントを受け続けた場合であるが, ここで考える切りくずは速度 v_c で流れているから, $1.5 M_e$ 以上の曲げモーメントを受けるのは短い時間に限られる. このような場合の変形を求めるには変形の進行する速度を考えねばならない. 変形速度は曲げモーメントの最も大きい刃先点 $s=0$ で最大で, 刃先点から離れるにつれて曲げモーメントが減少するから変形速度も減少する. そして曲げモーメントが $1.5 M_e$ の点 $s=s_0$ に達したときにはすでに十分大きな塑性変形が生じているから, $1.5 M_e$ 以下の曲げモーメントを受けても塑性変形はそれ以上進行しない. ゆえに $M < 1.5 M_e$ の範囲すなわち $s > s_0$ においては切りくずは弾性力学的法則に従う. 以上のことを考えあわせて $M \geq 1.5 M_e$ の範囲 $s \leq s_0$ における変形速度は $(M - 1.5 M_e)$ に比例すると考える. すなわち切りくずの中立層の曲率 $(1/\rho)$ の時間的変化率が β を比例定数として次式で表わされる.

$$\frac{d(1/\rho)}{dt} = \beta (M - 1.5 M_e), \quad 0 \leq s \leq s_0 \quad \dots (1)$$

以上のように考えてまず切りくず上任意の点 s における中立層の曲率半径 ρ を s の関数として求める. 切りくずが横切刃と垂直な方向に流れる速度 v_c は

$$v_c = ds/dt$$

であるから (1) 式は次のように書き直せる.

$$d\left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{\beta}{v_c} (M - 1.5 M_e) ds, \quad 0 \leq s \leq s_0 \quad \dots (2)$$

曲げモーメント M は (4) の仮定により次のように表

$$\left. \begin{aligned} \int \frac{1}{\rho} ds &= 1.5 \frac{\beta}{v_c} M_e \frac{1}{l-s_0} \left(\frac{s_0^2}{2} s - \frac{s_0^3}{6} \right) - 1.5 \frac{M_e}{EI} \frac{1}{l-s_0} \left(\frac{1}{2} s^2 - s_0 s + \frac{s_0^2}{2} \right) \\ y &= 1.5 \frac{\beta}{v_c} M_e \frac{1}{l-s_0} \left(\frac{s_0^2}{4} s^2 - \frac{s_0^3}{6} s + \frac{s_0^4}{24} \right) - 1.5 \frac{M_e}{EI} \frac{1}{l-s_0} \left(\frac{1}{6} s^3 - \frac{s_0}{2} s^2 + \frac{s_0^2}{2} s - \frac{s_0^3}{6} \right) \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

切りくずがチップブレーカに接するという条件は

$$s=l \text{ において } y=h$$

わされる.

$$M = 1.5 \frac{l-s}{l-s_0} M_e$$

これを (2) 式に用いて

$$d\left(\frac{1}{\rho}\right) = 1.5 \frac{\beta}{v_c} M_e \frac{s_0-s}{l-s_0} ds, \quad 0 \leq s \leq s_0$$

これを $s=0$ において $(1/\rho)=0$ の初期条件で積分すると次式を得る.

$$\frac{1}{\rho} = 1.5 \frac{\beta}{v_c} \frac{M_e}{l-s_0} \left(s_0 s - \frac{1}{2} s^2 \right), \quad 0 \leq s \leq s_0 \quad \dots (3)$$

$s > s_0$ の範囲では 5) に述べたように切りくずは弾性力学的法則に従うから M の減少に伴ってはねかえりを生ずる. このはねかえりの曲率は

$$1.5 \frac{M_e}{EI} \frac{s-s_0}{l-s_0}, \quad (E \text{ は切りくずの弾性係数})$$

であるから $s_0 < s \leq l$ における ρ は次式で表わされる.

$$\frac{1}{\rho} = 1.5 \frac{\beta}{v_c} M_e \frac{1}{l-s_0} \frac{s_0^2}{2} - 1.5 \frac{M_e}{EI} \frac{s-s_0}{l-s_0} \quad \dots (4)$$

$$s_0 < s \leq l$$

(3) 式および (4) 式において β と s_0 は未知であるが, ここで切りくずがチップブレーカの角に接しているという条件を用いると β を消去することができる. すなわち切りくずのたわみ y は切りくず上任意の点の曲率半径 ρ が (3), (4) 式で与えられているから

$$y \approx \int \int (1/\rho) ds ds$$

によって y が s の関数として求まる. これを求めるのに $s=0$ において $\int (1/\rho) ds = 0$ および $y=0$ の初期条件を用いて計算すると

$0 \leq s \leq s_0$; (3) 式より

$$\left. \begin{aligned} \int \frac{1}{\rho} ds &= 1.5 \frac{\beta}{v_c} M_e \frac{1}{l-s_0} \left(\frac{s_0}{2} s^2 - \frac{1}{6} s^3 \right) \\ \int \frac{1}{\rho} ds \Big|_{s=s_0} &= \frac{1.5}{3} \frac{\beta}{v_c} M_e \frac{s_0^3}{l-s_0} \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} y &= 1.5 \frac{\beta}{v_c} M_e \frac{1}{l-s_0} \left(\frac{s_0}{6} s^3 - \frac{1}{24} s^4 \right) \\ y \Big|_{s=s_0} &= \frac{1.5}{8} \frac{\beta}{v_c} M_e \frac{s_0^4}{l-s_0} \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

$s_0 < s \leq l$; (5), (6) 式を満足するように積分定数を与える. (4) 式より

であるから (7) 式をこれに用いて整理すると次のようになる。

$$1.5 \frac{\beta}{v_c} M_e \frac{s_0^2}{l-s_0} = \frac{24}{6-4\left(\frac{s_0}{l}\right) + \left(\frac{s_0}{l}\right)^2} \left[\frac{h}{l^2} + \frac{M_e}{4EI} \left\{ 1 - 2\left(\frac{s_0}{l}\right) + \left(\frac{s_0}{l}\right)^2 \right\} \right] \quad (8)$$

(8) 式を (4) 式に用いて $s=l$ と置けばチップブレーカを通り過ぎて流出してくる切りくずの中立層の曲率半径 ρ_e が求まる。ところで第5図に見るように l と W とはほぼ等しいから, $l=W$ において計算すると ρ_e は次式のようになる。

$$\frac{1}{\rho_e} = \frac{1}{6-4\left(\frac{s_0}{W}\right) + \left(\frac{s_0}{W}\right)^2} \left[12 \frac{h}{W^2} - 1.5 \left\{ 4 - \left(\frac{s_0}{W}\right)^2 \right\} \frac{\sigma_e}{E} \frac{1}{e} \right] \quad (9)$$

この式において (s_0/W) は先に仮定した塑性変形範囲の長さのチップブレーカの幅に対する比であるが, この値は切りくずの流出速度によって定まり, また被削材および工具形状の影響も受けると考えられる。したがって (9) 式の分母ならびに分子第2項の中括弧内は切りくずの流出速度, 被削材, 工具形状によって定まると考えられる。また σ_e および E は被削材の性質によるものであり, 同時に切りくずの温度によって変化する。したがって (σ_e/E) は切りくず温度の関数であり, ひいては削り速度の影響を受ける値である。 e は切りくずの厚さの半分であるから送り S に対して

$$e = \frac{\cos(\phi-\alpha)}{2 \sin \phi} S$$

ϕ : せん断角, α : 横すくい角

の関係があり, せん断角 ϕ は工具と被削材とが一定ならば, ほぼ一定とみなせるから e は S に比例すると考えられる。

これらのことを考慮して結局 (9) 式は次の形で表わすことができる。

$$\frac{1}{\rho_e} = C_1 \frac{h}{W^2} - C_2 \frac{1}{S} \quad (10)$$

ここで C_1, C_2 は被削材, 工具形状および削り速度によって変化する定数である。

(ii) ρ_e の削り速度および送りによる影響 実際の切りくずの ρ_e が削り速度によっていかに変わるかをしらべた。切込み 3 mm で実験を行い, 得られた VI 形および VI_a' 形の切りくずの ρ_e を測定し, それを削り速度について整理して第7図のごとき結果を得た。図においては削り速度 100 m/mn 附近における ρ_e を 1 とし, 他の速度における ρ_e を比較している。この図から送りが 0.1 mm/rev 以上であれば ρ_e は削り速度に無関係であることがわかる。したがってこの場合は (10) 式の C_1, C_2 を削り速度に無関係な定数としてよいわけである。しかし図で見ると送りが 0.05 mm/rev のように小さいときには ρ_e は削り速度によって影響され, 削り速度が大きくなると ρ_e も大きくなる。送り 0.05 mm/rev の場合, 特に削り速度 50 m/mn の低速では切りくずは銀白色で極端に小さ

第7図 ρ_e の削り速度による影響

く巻いてしまう。

また実際の切りくずのカール半径は切込みにも影響される。吉田氏ら⁽³⁾は切込みの増大によりカール半径が増大することを報告しているが、切りくずの分断の程度は切込みによってあまり影響されないで、以下において一定の切込みについてのみ考えることにする。

(iii) ρ_c を表わす式 切込み 3 mm で実験を行い、得られた VI 形および VI_a' 形切りくずの ρ_c を求め、多くの測定値から C_1 , C_2 の定数値を求めて

$$C_1 = 4.4, C_2 = 1.2 \times 10^{-2}$$

という値を測定した。したがって ρ_c は次式によって表わされる。

$$\frac{1}{\rho_c} = 4.4 \frac{h}{W^2} - 1.2 \times 10^{-2} \frac{1}{S} \dots\dots\dots (11)$$

第 8 図はチップブレーカの寸法の異なる二つの場合についてそれぞれ実験値を点で示し、(11)式による値を実線で示しているが、このようにはなほだよい一致を示した。

5. チップブレーカによる切りくずの分断

(i) 切りくずの分断の削り速度による影響 50, 100, 150, 200, 250 および 300 m/mn の 6 種の削り速度で切込み 3 mm, 送り 0.05~0.5 mm/rev で実験を行った。その結果によると、100 m/mn 以上の削り速度では送りがある場合には、削り速度を変化しても分断の程度はほとんど変化しない。しかし 50 m/mn では 100 m/mn 以上の場合よりも切りくずはよりこまかく分断して得られ、100 m/mn 以上において連続切りくずを生じた場合でも 50 m/mn では必ず分断切り

くずが得られた。したがって 100 m/mn 以下では同一のチップブレーカのチップブレーカ性能が向上すると言える。

(ii) 送りおよび ρ_c と切りくずの分断との関係

切りくずの分断の程度に大きく影響するのは結局送りと ρ_c である。これらの相互関係を明らかにするために縦軸に送りをとり横軸に (11) 式で計算される ρ_c をとって削り速度 100 m/mn 以上において、実際に生じた切りくずの分断の程度を区別して点をと第 9 図を得た。この図を見ると、分断過剰と考えるべき半巻きの切りくずは図の上側に、処理困難な連続切りくずは図の下側にそれぞれ分布し、チップブレーカ性能が適当な範囲は両者の中間にある。それぞれの範囲の境界は放物線

$$S^2/\rho_c = a$$

によって与えられるから、この a の値の大小によってチップブレーカ性能の大小が表わされる。 a は (11) 式を用いて次のようになる。

$$a = 4.4 S^2 \frac{h}{W^2} - \frac{1.2}{10^2} S \dots\dots\dots (12)$$

この式によりチップブレーカの長さ h , 幅 W および送り S が与えられれば a が求められ、その a が

$$\left. \begin{aligned} a < 10^{-2} \text{ mm}, & \quad \text{チップブレーカ性能不足} \\ 10^{-2} \leq a \leq 2 \times 10^{-2} \text{ mm}, & \quad \text{チップブレーカ性能適当} \\ a > 2 \times 10^{-2} \text{ mm}, & \quad \text{チップブレーカ性能過剰} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

の範囲のいずれにはいるかをしらべればチップブレーカ性能が判断できる。もちろん被削材あるいは工具形状が異なるときには、(13) 式の二つの境界値 10^{-2} , 2×10^{-2} mm はいずれも変わるべきである。

第 8 図 ρ_c の計算値と実験結果の比較

(11) 式で計算した切りくずの中立層の曲率半径 ρ_c mm

第 9 図 切りくずの分断の程度の分布図

6. チップブレーカの設計

以上の結果に基づいてチップブレーカの幅と高さを設計することができる。(12)式を変形して次の式を得る.

$$\frac{h}{W^2} = \frac{a + 1.2 \times 10^{-2} S}{4.4 S^2} \dots (14)$$

(13)式から適当に選んだ a の値と, 作業すべき送り S とを(14)式に入れ, (14)式を満たすようにチップブレーカの高さ h と幅 W を定めればよい. この方法によって, 簡単に最適なチップブレーカの設計を行えるようにしたのが第10図である. ただし100 m/mn以上の削り速度ならばこれでよいが, 100 m/mn以下では同一のチップブレーカのチップブレーカ性能が100 m/mn以上のときより向上することを考慮する必要がある.

7. 結 論

以上の実験および考察のおもな成果として次のことがあげられる.

- (1) チップブレーカによって生ずる外面のなめらかなつる巻状切りくずの曲率半径と, 送り, 削り速度およびチップブレーカの寸法との関係を塑性力学的に明らかにし, 曲率半径の式を得た.
- (2) チップブレーカによって切りくずが適当に分断して得られるための条件を明らかにし, その条件を表わす式を得た.
- (3) その式を用いて最適なチップブレーカを設計するための計算図表を作成した.

本研究により明らかにされたチップブレーカの寸法および切削条件と切りくずの挙動との関係は, 一般の鋼切削についても全く同様のことがあてはまり, 数式

第10図 チップブレーカを設計する計算図表

的にも若干の定数および数値を変更するだけで全く同じ形の式が成り立つはずである. このことは最近盛んに行われるようになってきたチップブレーカの使用におおいに役立つものと考え.

終りに実験材料に多大の便宜を与えられた住友電工, 住友金属両社に深じんの謝意を表す. なお研究は文部省科学研究費によって行ったものである.

文 献

- (1) 奥島, 漢, 機械学会論文集, 24, 142(昭33-6), 333.
- (2) E.K. Henriksen, *Chip Breaker*(1953), The National Machine Tool Builders Ass.
- (3) 吉田, 芦沢, 戸井田, 神奈川県工業試験所報.

論 文 集 25 巻 154 号 (昭 34-6) 正 誤 表

執 筆 者 名	ページ	欄	行	誤	正
海老原敬吉 他	458	英文摘要	7	par	per
	462	第9図	縦軸	“w/s 無次元” は	“w/s 無次元 × 10 ⁻⁷ ” とする.