鋼切削における切粉の挙動について*

奥 島 啓 式**, 湊 喜 代 士**

On the Behaviour of Chip at Steel Cutting

by Keiji OKUSHIMA and Kiyoshi MINATO

This paper describes the behaviour of chip in the case of steel cutting for the use of the design of chip breaker, and contains the following two parts. The first half describes the flow-out angle of chip, and that the values for the flow-out angle of chip calculated by the approximate theoretical equations accord with the measured values for various cutting conditions and tool designs, so that the authors draw up the nomograph for the flow-out angle of chip on the basis of the theoretical equations. The latter half describes the chip classification and the effect of cutting conditions on the shape of chip.

1. 緒 言

近時切削工具材料の進歩とともに、切削条件として次第に高速高送りの傾向が強くなってきているが、それとともに切粉の処理ということが問題になってきた。切粉の処理は主として作業者の安全と工具の寿命の点から行われる。その具体的な方法として最も普通に用いられるものはチップブレーカやチップフォーマであるが、これらの処置を施さない通常の切削における切粉の挙動を知っておかなければ、これらの正しい設計を行うことはできない。

この論文はチップブレーカに関する研究の一環として、通常の切削において切粉が排出される方向、あるいはその形状などについて調べた結果を述べるものである。

2. 実験装置および材料

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、そのおもなる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, 電動機馬力 15HP

被削材料の成分および性質を第 1 表に示す。素材は直径 90 mm, 長さ 770 mm の丸棒で、品物の直径の影響を避けるために直径が 75 mm 以下になったものは使用しなかった。

工具の材質は超硬合金 S1, その形状は第 1 図のご

第 1 図

とく JIS 33型(右勝手)で、ならい切削に対する適用を考慮してこのような取付け角 90°(横切刃角 0°)のバイトを用いた。バイトの仕上は超硬工具研削盤を用

いて GC といしによる研削およびダイヤモンドホイールによるラッピングを行い、更に刃先丸味はダイヤモンドハンドラップで仕上げ、その寸法・形状・角度などはツアイス社万能工具顕微鏡によって精密に測定検査した。

3. 切粉の流出角度

まず切削に際して切粉が工具のすくい面上いかなる方向に出るかについて検討してみる。第 2 図のごとく切粉の流出方向と品物軸線とのなす角を θ とし、これを流出角度と呼ぶことにする。この θ は切粉の擦過した条こんを観察することにより容易に測定することができる。

(i) 削り速度の影響 ノーズ半径 1.5 mm, 送

第 1 表

成 分 %							か た さ (ロック ウェル B)	引 張 強 さ kg/mm ²	伸 び %
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr			
0.44	0.33	0.65	0.017	0.024	0.17	0.10	89	64	25

* 昭和 32 年 10 月 13 日 創立 60 周年記念東京講演会において講演, 原稿受付 昭和 32 年 11 月 4 日。

** 正員, 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)。

第 2 図

第 3 図 (a)

第 3 図 (b)

第 3 図 (c)

り 0.3 mm/rev の一定とし、削り速度を 50, 100, 150, 220 m/min , 切込みを $0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ mm}$ と変化させて、その場合の流出角度を測定すれば第 3 図 (a) のごとくなる。これより流出角度は削り速度によりほとんど影響を受けないことがわかる。

(ii) ノーズ半径と切込みの影響 削り速度 150 m/min , 送り 0.3 mm/rev の一定とし、ノーズ半径を $0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 \text{ mm}$, 切込みを $0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ mm}$ に変化させてその流出角度を測定した結果を第 3 図 (b) に示す (図中の実線および点線は理論式によるもので、これについては後述する)。まずノーズ半径についていえば、ノーズ半径が大きくなるほど θ は大となる。また切込みについては既に第 3 図 (a) にも見るごとく、切込みが大きくなると常に切粉は品物の軸線に平行するように流れ出る。この影響はかなり顕著である。

(iii) 送りの影響 削り速度 150 m/min , ノーズ半径 1.0 mm の一定とし、送りを $0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8 \text{ mm/rev}$, 切込みを $0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ mm}$ に変化させて流出角度を測定した結果を第 3 図 (c) に示す (図中の実線は後述の理論式によるものである)。これからわかるように送りの影響はあまり大きくはなく、かつ送りとともにほぼ直線的に変化する。その変化割合は切込みによってほとんど影響されない。

(iv) ノーズ半径、切込みおよび送りの影響に関する理論的検討 切粉の流出角度を理論的に求めるために次の仮定を置く。すなわち切刃の微小部分についてはその部分の切粉はそれに直角に流れるとし (傾き角が 0 であるから微小部分については二次元切削とな

第 4 図

り、この仮定は常に正しい)、その角度を切刃の全長にわたって平均したものが切粉全体としての流出角度になるものとする。これを式で表わせれば次のようになる。

$$\theta_m = \int \theta dx / \int dx$$

ただし、 dx は切削にあずかる切刃の微小部分、 θ はその部分における流出角度である。上の仮定は切刃微小部分に作用する切削力が全部均一なりとして、それぞれの部分の切粉の厚みを考慮していないことになるが、いちおうこの仮定の下に流出角度を計算する。そしてこの計算に当っては、ノーズ半径 r 、切込み t および送り s の三者の関係から第 4 図に示すとき 6 種の

場合に分類して行う。ここに β は前切刃角である。

1 a) $s \leq 2r \sin \beta$, $t \geq r$ の場合 図のごとく切削にあずかる切刃を AB , BC の部分に分けると、それぞれの部分の切刃の長さとその部分から出る切粉の流出角度は次のようになる。

	切 刃 の 長 さ	流 出 角 度
$\overline{AB}$	$t-r$	0
$\widehat{BC}$	$r \left(\frac{\pi}{2} + \sin^{-1} \frac{s}{2r} \right)$	$45 + \frac{1}{2} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \sin^{-1} \frac{s}{2r}$

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{(t-r) \times 0 + r \left(\frac{\pi}{2} + \sin^{-1} \frac{s}{2r} \right) \left(45 + \frac{1}{2} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \sin^{-1} \frac{s}{2r} \right)}{(t-r) + r \left(\frac{\pi}{2} + \sin^{-1} \frac{s}{2r} \right)} \\ &= \frac{\left(\frac{\pi}{2} + \sin^{-1} \frac{s}{2r} \right) \left(45 + \frac{90}{\pi} \sin^{-1} \frac{s}{2r} \right)}{\left(\frac{t}{r} - 1 \right) + \left(\frac{\pi}{2} + \sin^{-1} \frac{s}{2r} \right)} \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

以下同様にして次のようになる。

1 b) $s \leq 2r \sin \beta$, $t < r$ の場合

$$\theta = 90 - \frac{90}{\pi} \left\{ \cos^{-1} \left(1 - \frac{t}{r} \right) - \sin^{-1} \frac{s}{2r} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

2 a) $r \left(1 + \frac{1}{\sin \beta} \right) \geq s > 2r \sin \beta$, $t \geq r$ の場合

$$\theta = \frac{\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{180} \beta \right) \left(45 + \frac{\beta}{2} \right) + \left\{ \frac{s}{r} \cos \beta - \sqrt{\frac{2s}{r} \sin \beta - \left(\frac{s}{r} \right)^2 \sin^2 \beta} \right\} (90 + \beta)}{\left(\frac{t}{r} - 1 \right) + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{180} \beta \right) + \left\{ \frac{s}{r} \cos \beta - \sqrt{\frac{2s}{r} \sin \beta - \left(\frac{s}{r} \right)^2 \sin^2 \beta} \right\}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

2 b) $r \left(1 + \frac{1}{\sin \beta} \right) \geq s > 2r \sin \beta$, $t < r$ の場合

$$\theta = \frac{\left\{ \cos^{-1} \left(1 - \frac{t}{r} \right) + \frac{\pi}{180} \beta \right\} \left\{ 90 - \frac{90}{\pi} \cos^{-1} \left(1 - \frac{t}{r} \right) + \frac{\beta}{2} \right\} + \left\{ \frac{s}{r} \cos \beta - \sqrt{\frac{2s}{r} \sin \beta - \left(\frac{s}{r} \right)^2 \sin^2 \beta} \right\} (90 + \beta)}{\left\{ \cos^{-1} \left(1 - \frac{t}{r} \right) + \frac{\pi}{180} \beta \right\} + \left\{ \frac{s}{r} \cos \beta - \sqrt{\frac{2s}{r} \sin \beta - \left(\frac{s}{r} \right)^2 \sin^2 \beta} \right\}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

3) $s > r \left(1 + \frac{1}{\sin \beta} \right)$, $t > s \tan \beta - \frac{r}{\cos \beta}$ の場合

$$\theta = \frac{\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{180} \beta \right) \left(45 + \frac{\beta}{2} \right) + \frac{\frac{s}{r} - (1 + \sin \beta)}{\cos \beta} (90 + \beta)}{\left(\frac{t}{r} - 1 \right) + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{180} \beta \right) + \frac{\frac{s}{r} - (1 + \sin \beta)}{\cos \beta}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

4) $r=0$ の場合

$$\theta = \frac{\frac{s}{\cos \beta} (90 + \beta)}{t + \frac{s}{\cos \beta}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

(1)~(6) の計算式によって計算した θ の値を第 3 図 (b) (c) の実線に示す。式の作成に当ってはかなりの仮定が含まれているが、図に見るごとく実験結果とよく一致し、切込みおよびノーズ半径の小さいときに特に著しい一致を示す。

前切刃角 β の小さいときは次の略算式によってもよい。

$$1a) \quad \theta = \frac{\pi/2}{\frac{t}{r}-1+\frac{\pi}{2}} \times 45 \dots\dots\dots (1)'$$

$$1b) \quad \theta = \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(1 - \frac{t}{r} \right) \right\} \times 90 \dots\dots\dots (2)'$$

$$2a) \quad \theta = \frac{\frac{\pi}{4} + \frac{s}{r} \cos \beta - \sqrt{\frac{2s}{r} \sin \beta}}{\left(\frac{t}{r} - 1 \right) + \frac{\pi}{2} + \frac{s}{r} \cos \beta - \sqrt{\frac{2s}{r} \sin \beta}} \times 90 \dots\dots\dots (3)'$$

$$2b) \quad \theta = \frac{\cos^{-1} \left(1 - \frac{t}{r} \right) \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(1 - \frac{t}{r} \right) \right\} + \frac{s}{r} \cos \beta - \sqrt{\frac{2s}{r} \sin \beta}}{\cos^{-1} \left(1 - \frac{t}{r} \right) + \frac{s}{r} \cos \beta - \sqrt{\frac{2s}{r} \sin \beta}} \times 90 \dots\dots\dots (4)'$$

$$3) \quad \theta = \frac{\frac{\pi}{4} + \left\{ \frac{s}{r} - (1 + \sin \beta) \right\} / \cos \beta}{\left(\frac{t}{r} - 1 \right) + \frac{\pi}{2} + \left\{ \frac{s}{r} - (1 + \sin \beta) \right\} / \cos \beta} \times 90 \dots\dots\dots (5)'$$

$$4) \quad \theta = \frac{s}{t+s} \times 90 \dots\dots\dots (6)'$$

この略算式による計算値を第3図(b)に点線で示すが、これもかなりよい近似を示す。

4. 切粉の形態

(v) 流出角度計算図表の作成 既に述べたように切粉の流出角度は、チップブレーカの正確な設計のためには必ず知っておかねばならない。

たとえばチップブレーカのみぞ幅と高さから切粉のカール直径が決定されるとする Henriksen⁽¹⁾ のいわゆる Kopenhagen の公式を適用するにしても、流出角度によって実際のみぞ幅が変化するから当然カール直径は変化するに違いない。したがって簡易に流出角度を知ることが望ましいから、上記の略算式を用いてその計算図表を作成する。

まず第5図は工具の前切刃角 β 、ノーズ半径 r 、送り s および切込み t によって前記の6種の区分のいずれに相当するかを示す図表である。たとえば前切刃角 5° の場合においては図中斜線によって区分される範囲がそれぞれの領域を示している。他の前切刃角の場合も同様である。このような範囲がわかれば、公式により流出角度を算出すればよいが、これを図表で求めるようにすればいっそう便利であろう。たとえば $\beta = 5^\circ$ の場合に対して送り s 、切込み t およびノーズ半径 r と流出角度 θ との関係を示すものが第6図である。図においては横軸に t/r 、縦軸に s/r をとり、 θ をパラメータとして与えている。この図表によって容易に切粉の流出角度を求めることができる。

(i) 切粉形態の分類 チップブレーカを用いなければならない切削条件の範囲を知ることは重要な問

第 5 図

(1) E. K. Henriksen, *American Machinist*, Special Report No. 360(1954).

題であるが、これは被削材料の種類によって変化するため一般には定め難い。しかし切削条件あるいは工具条件が切粉の形態にいかなる影響をおよぼすかを知らることはできる。そのためにはまず切粉形態の分類を行わなければならない。この場合の形態とは外観的なものであって、切削機構などについて考慮するもので

はない。また既に Henriksen⁽¹⁾ らの分類もあるが、これはチップブレーカをつけた場合の切粉の分類であって、ここではそれ以前の一般切削の場合について行うものである。

第7図に分類一覧表を示す。鋼を超高速切削するとI型として示すところの直線型が現われる。すなわち真直かあるいはきわめて大きい半径でカールする切粉になる。この状態から削り速度を次第におそくすればカール半径は次第に小さくなる。しかし部分部分によってなおカール半径がときどき大きくなろうとする傾向を示すためには不均一径連続切粉が出てくる。これがII型である。これより更に削り速度を落すと、今度はカール径のそろった等径連続のつる巻状切粉、すなわちIII型となる。これがいわば基本形態である。

このような基本形態の切粉を出す切削条件から切込みを小さくすると再び巻径の均一性は乱れてくる。この状態の切粉がIV型で、これより更に切粉が薄くなるともはやつる巻型とならずに、V型のごとく乱雑な塊となる。要するに鋼切削において流れ型の切粉を出す場合、切粉となつてからなら外部

から力が加わらなければ、切粉はこのような5種の型のいずれかとなる。ところがこの切粉に外力が働くとその状態は変ってくる。たとえばチップブレーカで曲げられあるいはジャンクに突き当たりなどして第7図下欄の分断型の切粉が出るようになる。すなわちI型の直線状切粉が分断されてI'型となり、IIおよびIII型

第 7 図

のつる巻状切粉は数巻ごとに分断されて II', III_a' 型となり, 更に細かく割れることにより III_a' 型(1巻き), III_a' 型(半巻き)に変化する。

(ii) 削り速度と切込みの影響 ノーズ半径 1.5 mm, 送り 0.3 mm として 50~200 m/mn の削り速度, 0.25~2.0 mm の切込みに対して得られる切粉の形を分類すると第 8 図のようになる。このノーズ半径, 送りの場合は, この範囲の削り速度の変化は切粉の形態にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。ただし速度が大となると, III型すなわち均一直径の整然たるつる巻状切粉は現われにくくなり, 切込みの大きいときはときどきカール径が大になって I 型に近づこうとし, 切込みの小さいときは V 型すなわちボール状にかたまりうとして II または IV 型が現われる。切込みの影響についていえば, 切込みを大きくすれば一般に IV 型から III 型, II 型を経て I 型に移行する。

(iii) 送りの影響 ノーズ半径 1.0 mm, 削り速度 150 m/mn として切込みを 0.25~2.0 mm, 送りを 0.05~0.8 mm/rev の範囲に変化せしめたときに得られる切粉の形を示したものが第 9 図である。まず切込み 1.5 mm 以上, 送り 0.65 mm/rev 以上の範囲で一卷断片の分断型切粉を生ずるようになる。しかしこのような大きい切込みでも, 送りが 0.5 mm/rev 以下になると, III_a' 型を経て III 型のつる巻型となり, 更に送

りが小さければ, II 型になる。また切込みが 1 mm 以下の場合は送りの小さいとき IV 型で, 送りの大となるとともに II 型になるが, この境界はかなり不確実である。送りが小さくなれば当然切粉が薄くなり, 曲げられやすくなってカール直径は小さくちぢれた感じの切粉となるのである。

(iv) ノーズ半径の影響 削り速度 150 m/mn, 送り 0.3 mm として切込みを 0.25~2.0 mm, ノーズ半径を 0~1.5 mm の範囲に変えて, 前と同様に得られた切粉を分類したものが第 10 図である。この場合は前二者に比べてその影響はかなり複雑である。この条件ではノーズ半径の大きいときは一般に II 型の切粉である。しかし切込みの大きいところではノーズ半径を小さくすることにより III 型の正規つる巻状となる。切込みがやや小さくなると切粉は分断し始め, III_a' 型更には III_a' 型の切粉が出るようになり, 切込みが 1 mm くらいになると最もその傾向が強い。切込みが更に小さくなると今度は切粉は分断しにくくなり, 0.25 mm の切込みでは IV 型の切粉となる。

(v) 考察 切粉の形を決定する第一の因子は切粉のカール状況である。三次元切削の場合切粉のカールは二つの方向に分けて考えられる。すなわち切刃に平行な軸を中心とするもの〔第 11 図(a)〕と切刃に直角な軸を中心とするもの〔第 11 図(b)〕である。前者は二次元切削において常に問題となる切粉のわん曲であり, 後者は三次元切削において初めて現われるものである。(a) のカールが主として起った場合切粉はパイプ状になり, すくい面にこすられて光った平

第 8 図

第 9 図

第 10 図

第 11 図

らな面が外側に現われる。チップブレイカにより切粉が曲げられるのもこのわん曲に属する。しかし本実験における切削条件下では、このようなわん曲はほとんど現われないで、大部分が (b) のわん曲を示した。このことは二次元切削ならば真直に伸びる直線状の切粉が得られることを示している。(b) のわん曲が起る場合は切粉はとがったらせん状になる。

さて上記のごとく切削条件によって切粉の形が変化するのは、すべてこのわん曲の程度が異なるためであると考えられる。このことは第 12 図に示す、削り速度、送り、切込みおよびノーズ半径を変えた場合の切粉カール半径 (得られた切粉のコイル半径そのものではないが、ほぼ等しい) の測定結果によって明らかである。たとえば、削り速度あるいは切込みを増せば半径は大となり、もちろん切粉は I 型に近づく。送りの変化による切粉形態の複雑さもまた同図 (c) から説

明される。

一般に切込みまたは送りのいずれかが極端に小さいときは例外なく V または IV 型になるが、これに対し切粉が厚くなってくると切粉の分断現象が起る。次にこの分断について考察する。切刃を流れ出た切粉はほぼ水平にわん曲してまず最初バイトの側壁にこすりつけられる (カールが大きければ品物に当ることもある)。このこすりつけのために切粉は切刃を軸として上に曲げられるが、その変形によって切粉に生ずる応力が材料の破壊強さをこえなければ切粉は分断されずに連続した切粉になり、もし応力が破壊強さをこえれば切粉は破断する。またその応力がほとんど破壊強さに等しいときは数巻の連続する巻ごとに分断が起る。すなわちこの場合ひずみ (すなわち変形量) が同一なのであるから切粉の断面積の大きいほど応力は大になり、分断しやすいことになる。断面積の抵抗モーメントは切込みは一乗、送りは二乗で利いてくるから、分断を容易にするには送りを大きくする方が効果的であるということになる。切粉の分断に対するノーズ半径の影響については、ノーズ半径そのものではなくて、それと切込みとの比が問題になるのであってこの値が小さいほど分断しやすくなる。

5. 結 論

以上の実験およびその考察の結果、鋼を切削するときの切粉の挙動について次のことを知った。

a. 切粉の流出方向について

- (1) 削り速度はほとんど影響しない (ただし 50 ~ 220 m/mn の範囲)。
- (2) ノーズ半径が大きいほど、また切込みが小さいほど切粉は品物から離れる方向に流れる。
- (3) 送りの影響は他に比べて小さいが、送りが大きくなると品物から遠ざかる傾向となる。
- (4) 切粉の流出方向を算出する理論式はかなりよく実験結果と一致する。
- (5) この理論式を用いて切粉の流出方向の計算図表を作成した。

b. 切粉の形態について

- (1) 切粉の形態を連続型 5 種、分断型 5 種に分類した。
- (2) 削り速度および切込みが大きくなるほど切粉のカール半径は大きくなり、I 型に近づく。
- (3) 送りが大きくなればやはりカール径は大きくなるが、ある程度以上大きくなると分断型切粉が現われる。
- (4) ノーズ半径が大きくなれば一般にはカール径は大になるが、反対に小さくなると分断型になる。ただし切込みが小さ過ぎるときや、大き過ぎるときには分断しない。

以上の結論は工作能率増進を目的とする切粉の処理という重大な問題に対してなんらかの資料を与えるものと考えられる。

第 12 図 (a)

第 12 図 (b)

第 12 図 (c)