3次元切削に関する基礎的研究 (第5報)

——切りくず断面形状について——

橋本文雄* 山崎直樹** 杭瀬秀和***

The Mechanism of Three-dimensional Cutting Operations (Part 5)

—— On the Sectional Contour of the Chip ——

Fumio HASHIMOTO, Naoki YAMASAKI, Hidekazu KUISE

The sectional contour of the chip is experimentally analyzed for investigating the mechanism of the chip formation in the case of the single point cutting tool with side cutting edge angle.

Since the nose part of the tool also participates in the cutting in the general three-dimensional cutting operation, it is necessary to investigate how the nose part of the tool would influence the cutting mechanism. Then, in this paper, how the sectional contour of the chip changes, if the nose radius, the side cutting edge angle, and the normal side rake angle of the tool, and the cutting condition would change, is experimentally verified. Specimens are picked out mainly from S35C, and also S15C and S55C are offered for the experiment.

As a result, it is made clear that the width of the chip approximately coincides with the length of the lateral side of the cutting area, and that the sectional contour of the chip considerably coincides with the shape of the cutting area which is replaced with the simple triangle or trapezoid by assuming the shear angle would be kept constant along the cutting edge.

Moreover, since it is possible to design the chip breaker if the thickness of the chip is known, the monographies are drawn up for helping the chip treatment in the general factories.

1. 緒 論

3次元切削のなかで、旋盤などでよく使われる横切れ刃角を有する右勝手手の剣バイトで切削した場合の切りくず生成機構を考察するために、切りくずの断面形状について実験的に検討してみた。前報までに2次元切削の切削機構を3次元切削にあてはめる場合について考察したが、第3報¹⁾においては剣バイトのノーズ部分と前切れ刃の影響を無視して切削機構を考察し、ノーズ半径0のバイトを用いて実験を行ない、3次元切削と2次元切削を比較した。

そのとき述べたように剣バイトで切削するときは、刃先のノーズ部分でも切削が行なわれるので、ノーズ部分が切削現象にどのように影響するのかを考察しなければならない。

そこでこの報告では、ノーズ半径を有するバイトを用いて実験を行ない、まず切りくず断面形状について考察を行なってみた。この結果はつづいて報告するように、3次元切削におけるせん断ひずみの考察につながるものである。3次元切削の切りくず断面形状に関しては、G. V. Stabler²⁾の報告があるが、Oblique Cuttingの場合で、ここで述べるような3次元切削については言及していない。

ここではS35Cを主な被削材とし、バイトの横切れ刃角、垂直横すくい角、ノーズ半径を種々変化し、また切削条件の送り、切込みを変化した場合の切りくず断面形状について考察した。また続いて報告するように生産作業における切りくず処理には、切りくずの厚さがわかればチップブレーカの設計ができるので³⁾切りくず厚さに関する計算図表も作成した。

2. 符号の説明

図1は横切れ刃角を有する右勝手手の剣バイトのノーズ

* 正会員 大阪府立大学工学部

** 正会員 神戸商船大学

*** 正会員 神戸市立大和田工業高等学校

図1 切りくず生成機構の模型図

半径0の場合の切りくず生成機構の模型図である。図においてX軸はバイトの取付け方向(切込みの方向)を示し、Y軸は切削の方向、Z軸は送りの方向を示す。本文中および図中の記号はそれぞれ下記のようなものをあらわす。

- α_n : 切れ刃傾き角 [度]
- α_n : 横切れ刃に垂直な平面内でのすくい角(垂直横すくい角) [度]
- C_s : 横切れ刃角 [度]
- r_n : X-Z座標面内でのバイトのノーズ半径 [mm]
- ϕ_n : 横切れ刃に垂直な平面内でのせん断角 [度]
- η_e : すくい面上で横切れ刃に垂直な平面と切りくずの流出方向とのなす角 [度]
- γ : X-Z座標面上で切りくず流出方向とX軸とのなす角 [度]
- t : 切込み [mm]
- s : 送り [mm/rev]
- L : 切れ刃の切削している部分の長さ [mm]
- L' : L のX-Z座標面上への投影長さ [mm]
- L'' : 切りくずの幅 [mm]
- S_c : 切りくずの厚さ [mm]

3. 切りくず断面の幾何学的考察

切りくず生成機構を単一せん断過程であると仮定すれ

 (a) $t / \{r_n(1 - \sin C_s) + s \cdot \cos C_s \cdot \sin C_s\} > 1$ のとき

 (b) $t / \{r_n(1 - \sin C_s) + s \cdot \cos C_s \cdot \sin C_s\} \leq 1$ のとき

図2 切削面積と切りくず断面

ば、Oblique Cutting においては図1のような模型図を画くことができる。図において切削面積 $A A' B' B$ の上部の被削材および切りくずの、バイトの切れ刃に垂直な平面内の断面を考えると、図の斜線部のようになり、切りくず生成機構はこの平面内で2次元と同様に考えればよい¹⁾。すなわち切削面積の厚さ $s \cdot \cos C_s$ がせん断過程を経て、切りくず厚さ S_c となると考えると、ノーズ半径を有する一般の3次元切削においても切り込みがノーズ半径よりも十分に大きければ、幾何学的にノーズの影響しない横切れ刃の部分においては、図1の斜線部と同様に切りくず厚さを取扱うことができる。

3.1 切りくず厚さ

いま、 $r_n(1 - \sin C_s) = a$ 、 $s \cdot \cos C_s \cdot \sin C_s = b$ とし(以下同様) $t / (a + b) > 1$ のときは図2(a)の切削面積 $A A' B' C$ において横切れ刃 $A' B'$ の範囲では前述のようにOblique Cutting と同様に取扱うと切削面積の厚さ $A H$ の部分がせん断過程を経て切りくず厚さ $A'' H$ となったと考えることができる。そして横切れ刃 $H B'$ の範囲では、切削面積の厚さは変化していないから切りくず厚さも幾何学的には $A'' B''$ の範囲では一定となる。したがっ

てこの範囲では図1のように Oblique Cutting と同様に取扱うと、切りくず断面のどの位置で切りくず厚さを測定しても切りくず厚さは一定となり、切削比は $r_c = s \cdot \cos C_s / S_c$ として計算することができる¹⁾。そしてこの切削比は切込み t がノーズ半径 r_n よりも十分に大きい範囲では切込み t に無関係で送りと横切れ刃角のみにより変化することになる。すなわち送りと横切れ刃角および垂直横すくい角が一定ならば切込みを変化しても切りくず厚さは変化しないことになる。

つぎにノーズ部の切りくず厚さについて考察する。ノーズ部においてのせん断変形も前述の A'B' と同様に切れ刃各部に垂直な断面内で考えることとする。図3において、図形 BB'C を切削面積とすると、切れ刃が円弧でしかも切削面積の厚さも B' より C の側に近づくにつれて、次第に減少するため、せん断面は B'DC の斜線部のような湾曲面が想像できる。

いま図3でノーズ部の任意の点 F の部分のせん断角を ϕ'_n とすると、図のように垂直横すくい角 α_n が 0° のときは点 F の部分の切りくず厚さ $S_c = EF$ は次のようにして求まる。

$$S_c = \overline{EF} \cdot \cot \phi'_n$$

図3において OF (O はノーズの曲率の中心) と送り方向とのなす角を δ [度] とすると

$$C_s \leq \delta \leq \cot^{-1} \{ \cot C_s - s / (r_n \cdot \sin C_s) \} \text{ のときには}$$

$$\overline{EF} = r_n - \frac{r_n - s \cdot \cos C_s}{\cos (\delta - C_s)} \quad (2)$$

$$\cot^{-1} \{ \cot C_s - s / (r_n \cdot \sin C_s) \} \leq \delta < (180^\circ - \cos^{-1} s / 2r_n) \text{ のときには}$$

$$\overline{EF} = r_n + s \cdot \cos \delta - \sqrt{r_n^2 - s^2 \cdot \sin^2 \delta} \quad (2')$$

$$\text{垂直横すくい角が } 0^\circ \text{ でないときは } \tan \phi'_n = r_c \cdot \cos \alpha_n$$

図3 ノーズ部の切削面積とせん断面の形状

$/(1 - r_c \cdot \sin \alpha_n)$ を使用して切りくず厚さは次のように求まる。

$$S_c = \overline{EF} (\cos \alpha_n \cdot \cot \phi'_n + \sin \alpha_n) \quad (3)$$

式(3)における α_n は図3における切れ刃微小部分 F に垂直な平面内のバイトのすくい角で、つぎのように算出できる。

$$\tan \alpha_n = \frac{\sin \alpha_{be'}}{\tan \left\{ \tan^{-1} \frac{\sin \alpha_{be'}}{\tan \alpha_n} - (\delta - C_s) \right\}} \quad (4)$$

$$\tan \alpha_{be'} = \tan \alpha_{b'} \cdot \cos (\delta - C_s) - \frac{\tan \alpha_n}{\cos \alpha_{b'}} \cdot \sin (\delta - C_s) \quad (5)$$

図3において切削面積厚さ EF に対応する切りくず厚さ S_c を実験結果より測定することができれば、せん断角 ϕ_n を求めることができるわけであるが、これは実験的にも S_c の測定が困難である。そこで $\phi_n \approx \phi'_n$ とすれば式(3)よりノーズ各部における切りくず厚さを算出できるので、これをもとにした切りくず断面の作図と切りくず断面写真との比較により $\phi_n \approx \phi'_n$ とおくことの是非はある程度吟味することができる。

後述するように、図14(b)は $\phi_n \approx \phi'_n$ としてノーズ各部の切りくず厚さを式(3)より算出して作図した切りくず断面と、切りくず断面写真のトレースとを単位長さを一致させて重ねたものである。

つぎに $t / (a + b) \leq 1$ のときの切りくず厚さについて考察する。いま図2(b)の図形 DD'C を切削面積とすると、採集した切りくずの断面は、図14(a)の切りくず断面写真に示すように、ほぼ三角形となるので、写真よりその最大厚さを測定することができる。この最大厚さは、切削面積の最大厚さ DE の部分が切れ刃に垂直な平面内のせん断過程を経て生成されたものとする、この部分のせん断角 ϕ_n は切削面積厚さ DE と切りくずの最大厚さ S_c を測定して切削比 r_c を計算することにより算出できる。この切削面積の厚さ DE は次のようにして求まる。

$$t / (a + b) \leq 1 < t / a \text{ のときは}$$

$$\delta = \tan^{-1} \left\{ \frac{r_n - t}{\frac{r_n}{\cos C_s} - (r_n - t) \tan C_s - s} \right\} \quad (6)$$

式(6)より求まる δ の値を式(2)に代入することにより DE の値が計算できる。

$$\text{また } t / a < 1 \text{ のときは}$$

$$\delta = \tan^{-1} \left\{ \frac{r_n - t}{r_n \cdot \cos \cdot \sin^{-1} \left(\frac{r_n - t}{r_n} \right) - s} \right\} \quad (7)$$

式(7)より求まる δ の値を式(2')に代入することにより DE の値が計算できる。

したがって切削比 r_c は $r_c = DE/S_c$ として求まる。

この最大厚さ以外の部分については、前述のノーズ部と同様に考えられるが、切れ刃各部の切削比は簡単に求められず、切りくず断面はかなりふくらんだ三角形になると想像される。

3.2 切りくず幅

図1において切れ刃の切削に關与する部分の長さ $A'B'$ の長さ L は次のように計算できる。

$$L = \frac{t}{\cos C_s \cdot \cos \alpha_{b'}} \quad (8)$$

そして切りくずがバイトのすくい面上で η_c の方向に流出するとすれば、切りくず幅 $A''B''$ 、すなわち L'' はつぎのようになる。

$$L'' = \frac{t \cdot \cos \eta_c}{\cos C_s \cdot \cos \alpha_{b'}} \quad (9)$$

以上は Oblique Cutting の場合であるが、ここで行った3次元切削においても同様に取扱うとすれば、図2において切削面積の幅 $A'C$ または $D'C$ が η_c の方向に流出して切りくず幅 L'' となると考えられる。このときの切削面積の幅 $A'C$ の長さはつぎのように計算できる。

横切れ刃が切削に關与するとき、すなわち $t \geq a$ のときは

$$A'C = \sqrt{l^2 + m^2} \quad (10)$$

式(10)において

$$l = t - r_n + \sqrt{r_n^2 - (s/2)^2}$$

$$m = \{t - r_n(1 - \sin C_s)\} \cdot \tan C_s + r_n \cdot \cos C_s + s/2$$

横切れ刃が切削に關与しないとき、すなわち $t < a$ のときは、 $D'C$ の長さは式(10)において

$$l = t - r_n + \sqrt{r_n^2 - (s/2)^2}$$

$$m = r_n \cdot \cos \cdot \sin^{-1} \frac{r_n - t}{r_n} + \frac{s}{2}$$

として計算できる。

そして $A'C = L'$ または $D'C = L'$ とし、切りくずがすくい面上で η_c の方向に流出するとすれば、切りくず幅 L'' は次のように幾何学的に計算できる。

$$L'' = \frac{L' \cdot \cos \eta_{ce}}{\cos \alpha_{be'}} \quad (11)$$

式(11)における $\alpha_{be'}$ 、 η_{ce} は次のようにして求まる値である。

$$\tan \alpha_{be'} = \tan \alpha_{b'} \cdot \cos (C_{se} - C_s) - \frac{\tan \alpha_n}{\cos \alpha_b} \cdot \sin (C_{se} - C_s)$$

$$\tan C_{se} = m/l$$

$$\tan \eta_{ce} = \frac{\cos \alpha_{ne}}{\cos \alpha_{be'}} \cdot \cot (\eta + C_{se}) + \tan \alpha_{be'} \cdot \sin \alpha_{ne}$$

$$\tan \alpha_{ne} = \frac{\sin \alpha_{be'}}{\tan \{ \tan^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_{b'}}{\tan \alpha_n} \right) - (C_{se} - C_s) \}}$$

以上のようにして図1の模型図より幾何学的に切りくず幅を求めることができるが、実際には2次元切削の場合と同様に、切りくず幅はかなり増加するので、切りくず断面の形状を予測するためには、式(11)のような計算で求めるよりもむしろ、つぎのような仮定を設けて切りくず幅を求めるほうが、後述するように実験結果とよく近似する。

すなわち横切れ刃が切削に關与するとき、つまり $t \geq a$ のときは図2(a)において $A'B'$ を C' まで延長し、 $A'C'$ の長さを切削長さ $A'B'C$ の長さに等しくとり、台形 $AA'C'B$ を切削面積とし $A'C'$ を切れ刃とする2次元切削と仮定し、切りくず断面が $A'A'C'K$ となったとする。このときの切りくず幅 $A'C'$ は次のように計算できる。

$$A'C' = L'' = \frac{t - r_n}{\cos C_s} + r_n \cdot \tan C_s + r_n \left(\sin^{-1} \frac{s}{2r_n} + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi C_s}{180} \right) \quad (12)$$

また切込みが浅いとき、すなわち $t < a$ のときは図2(b)において $D'C'$ を DE に垂直にとり、 $ED'' = ED'$ 、 $EC' = EC$ として三角形 $DD''C'$ を切削面積とし、 $D''C'$ を切れ刃とする2次元切削と仮定し、切りくず断面が三角形 $E'D''C'$ となったとする。このときの切りくず幅 $D''C'$ は次のように計算できる。

$$D''C' = L'' = r_n \left(\sin^{-1} \frac{s}{2r_n} + \cos^{-1} \frac{r_n - t}{r_n} \right) \quad (13)$$

以上のように L'' を仮定して実際の切りくず断面の写真と比較して考察をすすめよう。

4. 実験

この実験には8フィート高速旋盤を使用し、被削材はS15C, S35C, S55Cの3種類を用い、それぞれ900°Cで1時間焼鈍し、外径60φに仕上げて次のような条件で切削実験を行なった。

4.1 バイト

バイトは超硬P-20でその形状は(0°, Var, 6°, 6°, 15°, Var, Var)とし、垂直横すくい角は-10°, -7°, 0°, 10°, 20°, 30°, の6種類、横切れ刃角は0°, 15°, 30°, 45°の4種類、ノーズ半径は0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0mmの5種類として適宜組合わせた。

4.2 切削条件

切削条件は切削速度を100m/minの一定とし、切込みは0.5, 1.0, 1.6, 2.0mmの4種類、送りは0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5mm/revとして種々組合わせた。

以上の実験より切りくずを採集して、切りくずの各断面をその流出方向に垂直に研削仕上げし、工具顕微鏡で写真撮影し、切りくず幅、切りくず厚さを測定し、また

(被削材 S35C, $t=1.0\text{mm}$, $C_s=15^\circ$)

図4 切りくず厚さと切りくず断面積の最大値, 最小値およびその平均値

切りくず断面形状を観察した。

また切りくず厚さの測定には, 上記のように写真より測定するときは測定点を数多くとって, その平均値を求めるためには, 非常な手数を要するので, 次のような測定も同時に行ない, この妥当性も合わせて検討した。

切りくずはその流出方向の断面を見ると, パイトのすくい面と摩擦した反対側は波形になっているため, 最大値と最小値を測定して, その平均値を求めることができる。

この平均値を切りくず厚さとすることになると, 切りくず厚さはW14のねじマイクロメータで測定した値とよく近似する。

図4の(1), (2)の曲線(1)は断面写真より測定した切りくず厚さの最大値, 曲線(3)は最小値, 曲線(2)は最大厚さと最小厚さの平均値で×印はW14のねじマイクロメータによる測定値である。このW14のねじマイクロメータで切りくず厚さを測定すると, 多数の測定点の

平均値を求めることが容易であるのでこのマイクロメータによる測定値を切りくず厚さとした方がよいことがわかった。

5. 実験結果とその考察

5.1 切りくず厚さ

まず $t \geq a+b$ の場合についての切りくず厚さを考察する。図5はS35Cをノーズ半径0.5mm, 垂直横すくい角 -7° のバイトで切削したときの送りと切込みの影響を示す。切込みをパラメータにしているが, 切込みの変化に伴う切りくず厚さの変化は顕著でない。むしろ $t \geq a+b$ の範囲では, 切込みは切りくず厚さに影響しないと考えてもよいと思われる。そして切りくず厚さは送りの増加に伴いほぼ直線的に増加し, その勾配は横切れ刃角の増加に伴いわずかにゆるくなっている。

いまノーズ半径0.5mm, 垂直横すくい角 -7° , 横切れ刃角 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ のバイトで切削したとき, 切りくず厚さは切込みに

(被削材 S35C $\alpha_n=-7^\circ$, $\alpha_b'=0^\circ$, $r_n=0.5\text{mm}$)

図5 切りくず厚さ

 図6 切削比 r_c

は影響されないものとして、切込み 1.0, 1.6, 2.0mm の同じ横切れ刃角と送りに対する切りくず厚さの平均値をその送りに対する切りくず厚さとし、切削比 r_c を求めると図6のようになる。

図6は横軸に切削面積の厚さ $s \cdot \cos C_s$ 、縦軸に切削比 r_c を示し、横切れ刃角をパラメータにしている。この図より切削面積の厚さ $s \cdot \cos C_s$ の増加に伴い、切削比 r_c は増加するが、特に横切れ刃角の変化に伴う切削比の変化は認められない。したがって、横切れ刃角の変化は切削面積の厚さを変化させるために切り

くず厚さが増加するもので、特に横切れ刃角の変化が直接切りくず厚さに影響を及ぼすとは考えられない。この

図7 切りくず厚さと実験式の比較

 (a) 被削材 S35C, $r_n=0.5\text{mm}$, $t=1.5\text{mm}$

 (b) 被削材 S35C, $r_n=0.5\text{mm}$, $t=1.5\text{mm}$

図8 切りくず厚さと垂直横すくい角

ことは S55C, S15C についても同様である。

図7は S55C, S15C の送りと切りくず厚さの関係を示す。

示す。この切りくず厚さはノーズ半径 $r_n=0.5\text{mm}$ で切込み 1.0, 1.5, 2.0mm のときの切りくず厚さの平均値である。

図8はノーズ半径0.5mm, 切込み1.5mmで, 垂直横すくい角を変化したときの切りくず厚さを示す。切りくず厚さは垂直横すくい角の増加に伴い減少し, その影響は送りの増加に伴い大きい。

つぎに切込みの小さいときすなわち, $t \leq a+b$ のときの切りくず厚さについて考察する。

この範囲では横切れ刃角の影響は無視できる。図9は垂直横すくい角 -7° のときのS15C, S35C, S55Cの切りくず厚さである。S15Cは実験値のちらばりが大きいから傾向を観察し難いが, S35C, S55Cでは送りの増加に伴い直線的に切りくず厚さも増加している。

また t/r_n が大きいほど切りくず厚さは増加している。これは図2(b)における切削面積の厚さが t/r_n の変化に伴い変化すると傾向は同じである。

S15Cも理論的にはS55C, S35C等と傾向が同じであるはずと思われるが, 被削性が悪いために切削条件

が正確さを欠くためのちらばりだと思われる。

5.2 切りくず厚さの実験式

実験結果より切削条件の変化に伴う切削比 r_c の変化の様子を図6より考察して, 次のような切りくず厚さを求める実験式を作成した。

すなわち被削材がS35Cについては

$$t/(a+b) \geq 1 \text{ のとき}$$

$$S_c = s \cdot \cos C_s (2 - \sin \alpha_n) + 0.15 - 0.1 \sin \alpha_n \quad (12)$$

$$t/(a+b) \leq 1, \alpha_n = -7^\circ \text{ のとき}$$

$$S_c = (2.12 \cdot s + 0.162)(0.4 t/r_n + 0.6) \quad (13)$$

またS55Cについては

$$t/(a+b) \geq 1, \alpha_n = -7^\circ \text{ のとき}$$

$$S_c = 1.8 s \cdot \cos C_s + 0.11 \quad (14)$$

$$t/(a+b) \leq 1, \alpha_n = -7^\circ \text{ のとき}$$

$$S_c = (1.8 s + 0.11)(0.4 t/r_n + 0.6) \quad (15)$$

S15Cについては

$$t/(a+b) \geq 1, \alpha_n = -7^\circ \text{ のとき}$$

$$S_c = 2.1 s \cdot \cos C_s + 0.42 \quad (16)$$

$$t/(a+b) \leq 1, \alpha_n = -7^\circ \text{ のとき}$$

$$S_c = (2.1 s + 0.42)(0.4 t/r_n + 0.6) \quad (17)$$

図5, 7, 8, 9の実線は上記の実験式より算出した切りくず厚さを示す。実験値のちらばりがかなり大きいので, 完全には実験式の計算結果とは一致しないが, だ

図9 $t/\{r_n(1 - \sin C_s) + s \cdot \cos C_s \cdot \sin C_s\} \leq 1$ のときの切りくず長さ

$$S_c = s \cdot \cos C_s (2 - \sin \alpha_n) + 0.15 - 0.1 \sin \alpha_n$$

$$t/\{r_n(1 - \sin C_s) + s \cdot \cos C_s \cdot \sin C_s\} \geq 1 \text{ のとき}$$

被削材 S35C

図10 切りくず厚さ

$$\text{S15C } S_c = (2.1s + 0.42) \left(0.4 \frac{t}{r_n} + 0.6 \right)$$

$$\text{S35C } S_c = (2.12s + 0.162) \left(0.4 \frac{t}{r_n} + 0.6 \right)$$

$$\text{S55C } S_c = (1.8s + 0.11) \left(0.4 \frac{t}{r_n} + 0.6 \right)$$

$$t / \{ r_n (1 - \sin C_s) + s \cdot \cos C_s \cdot \sin C_s \} \leq 1 \text{ のとき}$$

図11 切りくず厚さ

$$\text{S15C } S_c = 2.1s \cdot \cos C_s + 0.42$$

$$\text{S55C } S_c = 1.8s \cdot \cos C_s + 0.11$$

$$\left. \begin{aligned} t / \{ r_n (1 - \sin C_s) + s \cdot \cos C_s \cdot \sin C_s \} \geq 1 \\ \alpha_n = -7^\circ \end{aligned} \right\} \text{ のとき}$$

図12 S15C, S55Cの切りくず厚さ

いたい傾向は合っていると考えられる。

後報でも述べるように切りくず処理の立場から、切りくず厚さが切削条件より予測できると、チップブレーカの設計を行なうことができるので、実験式より図10, 11, 12のような計算図表を作成した。

図10は S35Cの $t/(a+b) \geq 1$ のときの計算図表である。使用法は、まず横切れ刃角を選んで右に進み、送りの線と交わった点から垂直に下に進み、垂直横すくい角と交わった点から、さらに左に折れると切りくず厚さが読みとれる。

図11は $t/(a+b) \leq 1$ のときの計算図表で、まず t/r_n を算出し、その位置から右に進み、それぞれの被削材の送りの線と交わった点から下に直角に進むと、切りくず厚さが読みとれる。

また図12は S15C, S55Cの $t/(a+b) \geq 1$ のときの計算図表である。

5.3 切りくず幅

切りくず幅の実験値を図13に示す。切りくず幅は送りの増加に伴い増加するが、垂直横すくい角の影響ははっきりしない。むしろ切りくず幅は垂直横すくい角には影響されないと考えてさしつかえない。前述のように、いま切削面積の切削に關与する切れ刃の部分の長さを幾何学的に式(2), (3)のように仮定し、この計算値を図13に実線で示した。

実験結果は計算値と傾向がよく近似している。また破線は式(10)で計算した切りくず幅の理論値（垂直横すくい角の影響はほとんどない）であるが、実験値とはかなり異なる。したがって、切りくず幅は式(2), (3)のような仮定により求めるほうが、式(10)の理論値よりも実験結果とよく近似することがわかる。

5.4 切りくず断面形状

切りくず断面形状を考察するために、まず切りくず断

$$r_n = 0.5 \text{ mm}, t = 1.0 \text{ mm}, C_s = 15^\circ \text{ (左図)}$$

$$r_n = 0.7 \text{ mm}, t = 1.0 \text{ mm}, C_s = 15^\circ \text{ (右図)}$$

図13 切りくず幅 被削材 S35C

面と切削面積を比較した。また切りくず断面積を切りくず断面写真よりプランイメータで測定して、つぎのような考察も行なった。

図14(a)は切りくず断面写真を示す。また図14(b)は写真と、そのときの切削面積を合わせて画いているが、図のように切削面積AA'CまたはDD'Cが変形後実線のような切りくず断面となるのである。

また切りくず断面は図14(a)の(3)の断面写真のように、一般に最大値と最小値が観察できるので図4の(3), (4)のように曲線(1)の最大値と曲線(3)の最小値とを測定し、その平均値を曲線(2)に示しているが、この平均値を切りくず断面積とすることにする。

ノーズ半径, 切込み, 垂直横すくい角を変化したときの切りくず断面積を図15に示す。この図の(1), (2)より送り, 切込みの増加に伴い切りくず断面積は増加している。これは切削面積の増加と, 図5, 6より明らかなように送りの増加に伴い切りくず厚さが増加するためであ

図14(b) 切りくず断面の理論的形狀と断面写真との比較

(1) $t=0.5\text{mm}$ $s=0.4\text{mm/rev}$

(2) $t=1.0\text{mm}$ $s=0.1\text{mm/rev}$

(3) $t=2.0\text{mm}$ $s=0.4\text{mm/rev}$

$\alpha_n = -7^\circ$, $C_s = 45^\circ$, $r_n = 0.8\text{mm}$

図14(a) 切りくず断面写真 被削材 S35C

図15 切りくず断面積 被削材 S35C

る。また図15の(4)より垂直横すくい角 α_n の増加に伴い切りくず断面は減少の傾向にあるが、これは図8の1, 2より α_n の増加に伴い切りくず厚さは減少の傾向にあるためである。

図15の(3)よりノーズ半径の変化に伴う切りくず断面積の変化はあまりみられない。これは次のような理由からである。すなわち、切込み、送りを一定にしてノーズ半径だけを変化しても切削面積の変化はほとんど問題にならないし、また $t/(a+b) \geq 1$ のときと、 $t/(a+b) \leq 1$ のときとも切りくずの断面積がほぼ等しいから図2(a), (b)における $t/(a+b) \geq 1$ のときの切れ刃A'B'の部分のせん断角 ϕ_n と $t/(a+b) \leq 1$ のときの切れ刃Eの点でのせん断角 ϕ_n' とがほぼ等しいと考えられるからである。

また切れ刃部Eは切れ刃D'Cの途中に存在するので切れ刃D'Cの全域にわたっての各点におけるせん断角 ϕ_n' はすべて ϕ_n に近値すると考えても大差ないと思う。

つぎに切りくず断面形状について考察する。まず切込みがノーズ半径よりも十分大きいとき、すなわち $t/(a+b)$

$b) \geq 1$ のときは切りくず断面形状は図2(a)のA'C'は式(12)で計算できる値、すなわちA'B'C'に等しくとり、A'C'を下底、A''K (A Bに等しい) を上底とする台形に近似すると仮定する。この仮定の妥当性を吟味するために、まず切りくず断面写真より測定した断面積をこの台形A''A'C'Kの面積とし、上底と下底の計算値より算出した切りくず厚さと、断面写真より測定した切りくず厚さとを図16で比較した。図16の破線は計算値、実線の折線は測定値である。先に述べたように、ノーズ部の断面形状は、いま仮定したようにKC'の部分が直線にならず、もっとふくらみがあるはずだから、これを直線として計算したために図15のように計算値は実測値よりも少し厚くなっているが、だいたい近似している。

$t/(a+b) \leq 1$ の場合は、図2(b)のD''C'を底とする三角形を切りくず断面形状と仮定し、切くず断面写真より測定した断面積をこの三角形の面積とし、D''C'を式(8)より算出してD''C'を底として高さEE'、すなわち切りくず厚さを求めた値と、断面写真より測定した切りくず厚さを図16に示したが、前記と同じことが云える。

この切りくず断面形状をもっと厳密に求めるためには、前述のように $\phi_n \approx \phi_n'$ としてノーズ部各部の切りくず厚さを式(3)より算出して作図することができる。すなわち、図14(b)の切削面積AA'C, DD'Cを前述の仮定のようにA'B/C, D'ECの長さに等しくA'C', D'C'と直線にとり、切れ刃各部の切削面積の厚さEFを式(2), (2')より算出すると斜線部のような切削面積となる。つぎに式(12)~(17)の実験式または図10~12の計算図表より切りくず厚さを求めて、せん断角 ϕ_n を計算し、式(3)よりノーズ各部の切りくず厚さを求めると、図14(b)の破線のような切りくず断面形状を画ける。実線は断面写真のトレースを単位長さを一致させて重ねたもので、非常によく近似している。このことから、横切れ刃の部分のせん断角とノーズ部のせん断角がほぼ等しいとしても大差ないと云える。

さきの切りくず断面形状の仮定は、このノーズ部の湾曲部を直線として取扱ったもので、図14(b), 図16より切りくず断面形状は、台形および三角形に近似しても大差ない。そして切削に関与した切れ刃を上述のように仮定し、切削面積をこのように台形または三角形と仮定し、2次元切削と同様に取扱ってもよいと考えられる。

6. 結 論

(1) 3次元切削においては切りくず厚さは、切込みの影響をほとんど受けず、送り、垂直横すくい角に影響されて変化する。

図16 切りくず断面写真より測定した切りくず厚さと仮定により計算した切りくず厚さとの比較

- (2) ノーズ半径, 横切れ刃角は切削面積の厚さを変化させるために, 切りくず厚さの変化をまねく。
- (3) 横切れ刃部分のせん断角 ϕ_n とノーズ部分のせん断角 ϕ_n' は等しいと考えて切削機構の考察を行なってもよい。
- (4) 切削面積を $t/\{rn(1-\sin C_s)+s \cdot \cos C_s \cdot \sin C_s\} > 1$ のときは台形, $t/\{rn(1-\sin C_s)+s \cdot \cos C_s \cdot \sin C_s\} \leq 1$ のときは三角形とおきかえて切削比を考察してもよい。
- (5) 切りくず幅は切削面積の切削長さ L' にほぼ近似する。
- (6) 切りくず厚さの実験式および計算図表を作成した。

- (7) 上記(5), (6)より切りくず幅, 切りくず厚さを求めて, 切りくず断面形状を予測することができる。
(1966, 4月4日受付)

文 献

- 1) 横山武人, 橋本文雄, 山崎直樹: 三次元切削に関する基礎的研究 (第3報), 精密機械, Vol. 29 No. 9 (1963) 653.
- 2) G. V. Stabler: The Fundamental Geometry of Cutting Tools, Instn. mech. Engr. Proc. (1951) 14.
- 3) 奥島啓式, 星鉄太郎, 藤縄孝: 鋼切削における切りくずの挙動について (第2報), 機械学会論文集, Vol. 25 No. 158 (昭34—10)972.