切りくずの彎曲について*

中 山 一 雄** 上 野 山 勝*** 田 村 清****

Chip Curl in Metal-Cutting Process

Kazuo NAKAYAMA, Masaru UENOYAMA, Kiyoshi TAMURA

From the observation and the theoretical consideration on the deformation of chip during orthogonal cutting, followings were found on the curl of chip :

(1) Owing to the secondary flow due to the tool-chip friction, the part of chip adjacent to the tool face behaved as if there was a built-up edge, which had a cylindrically curved face and curled the chip.

(2) The radius of curvature of chip ρ_0 was given approximately by the following equation :

$$\rho_0 = m^3 / 6 A_n$$

where m is the length of tool-chip contact and A_n is an area which is given by the deformation of chip due to the secondary flow.

(3) An effective cutting fluid decreased the length of tool-chip contact, and this was seemed to be the main reason for the decrease in the radius of curvature of chip.

(4) For the large depth of cut, the first rake face of double rake tool was covered with a built-up edge, which had a cylindrically curved face and curled the chip. For the small depth of cut, straight or even counterwisely curled chip was born by the same tool.

1. ま え が き

切削によって生ずる切りくずが、多くの場合彎曲していることは、我々のよく知っていることであり、実際の切削作業で切りくずが適当な曲率を持つか否かは、切り

図 1 従来の単純化した切削模型

くず処理の面で作業能率に大きな影響を及ぼすことは明らかである。特にフライスやブローチによる切削のように、切りくずを限られたチップポケット内に収容する必要がある場合には、切りくずの彎曲は非常に重要な問題となる。

一方、切削理論は最近著しく進歩したが、Piispanen や Merchant 以来用いられている図 1 のような単純化した切削模型、すなわち切りくず生成時の変形は一つの平面（剪断面）を通る時の剪断変形のみであるとする模型を基としている限り、この彎曲現象を理論的に説明することは不可能である。従つて、切りくずの彎曲現象を研究することは切削理論を更に一步現実に近づけるためにも有意義であると考えられる。

切りくず彎曲現象についてはすでに Ernst-Merchant¹⁾ Henriksen²⁾, Hahn³⁾, 竹山⁴⁾, 奥島-人見⁵⁾ 等による論文が発表されており、これら論文中にはそれ以前の研究についての批判がなされているので、ここでこれらに触れることは省略する。ただ、これらの研究に共通な点は、切りくずは剪断面（厳密にはそのひろがりを考慮して剪断領域）における変形に際して曲率を与えられて生まれてくるものとしており、そこを通過した後の塑性変形は考慮していないことである。

いま、剪断面を通過した後は全く変形しないものと仮

* 昭和36年精機学会春季大会にて講演

** 横浜国立大学工学部 正会員

*** 株式会社小松製作所

**** 日本建鉄株式会社 正会員

図 2 彎曲切りくず発生時の変形
(2次流れのない場合)

定して、彎曲した切りくずを生ずる場合の切りくず各部の変形を作図すると、図 2 のようになるはずである。すなわち剪断面通過後は変形しないためには、切りくず内の各部は切りくずの曲率中心を中心とする回転運動を行ない、各部の速度はその中心からの距離に比例しなくてはならない。したがって、被削材側面に引いた切削方向の刻線は、切りくずに入ると同心円になるが、これらの円弧の間隔は、体積一定の条件(連続の条件)から、外側ほど狭くなる。かりに切り込み深さを i 等分してあり切りくずの外半径を ρ_0 、内半径を ρ_i とすれば、外から n 番目の刻線の曲率半径 ρ_n は次式で計算できる。

$$\rho_n = \sqrt{\rho_0^2 - \frac{(n/i)(\rho_0^2 - \rho_i^2)}{2}} \quad (1)$$

かかる円弧群と切削方向の刻線との交点を結べば剪断面が得られるが、これは図 2 に点線で示すように、直線ではなしに上向きに凸の曲線になる。

一方、切削方向に直角だった刻線は、図のように上向きに凸な曲線になり、その間隔は曲率中心からの距離に比例して外側ほど広がる。

図 1 の切削模型は図 2 の曲率半径を無限大にした場合に相当する。

ここで問題になることは、図 2 では切りくずは外周も最初から一定の曲率を持ち、一般に平面である工具すくい面との間に隙間ができることになることである。Henriksen は切りくずの弾性変形によつてこの隙間がなくなるものとしたが、切りくずとすくい面との接触は塑性的であることは明らかである。

筆者らは、この隙間を埋めるものは工具すくい面の摩擦による切りくずの 2 次流れ (secondary flow) であり、実際にはむしろ逆に、この 2 次流れによつて切りくずが彎曲するものと考え、これを実験で確かめた。

2. 種々の切りくず彎曲現象に対する考察

2.1 チップブレーカによる彎曲

切りくずの処理を容易にするために、切りくずの流出経路上に図 3 のような障害物(チップブレーカ)をおい

図 3 チップブレーカによる切りくずの彎曲

て切りくずを強制的に彎曲させ、加工物や工具に当てて折断することは最近普通に行なわれているが、これは切りくず彎曲の因果関係が最も明確な場合であろう。

これを力学的に見れば、チップブレーカは切りくずに曲げモーメント M を与え、それが剪断面上に生じさせる応力 σ_M は自由面側では圧縮、すくい面側では引張りとなる。工具面から受ける応力 σ_T の剪断面上での分布については明らかでないが、かりにその方向は場所によつて変わらないものとするれば σ_M と σ_T の合力 σ の方向はすくい面側から自由面側にゆくとともに下向きになる。従つて剪断すべりはこの σ と一定の角をなす方向に起こるものと考えれば、剪断面は図のように上向きに凸になる。(図 3 の応力を示す矢印は、すべり方向の剪断応力 τ の大きさと σ_T の方向とが一定と仮定して描いた) その結果、すくい面側の方が切りくずは長くなり、彎曲することになる。

このように切りくずに曲げモーメントが働くと、その方向に切りくずが彎曲することはうなずける。(2次流

図 4 構成双先による切りくずの彎曲

れの影響は除外しても。)

2.2 構成刃先による彎曲

構成刃先が存在するような切削条件下では、切りくずはよく彎曲する。これは図4の如く、構成刃先のすくい角が刃先では大きな値 α ($30^\circ \sim 40^\circ$) であるが、上方にゆくに従つて漸減して工具自体のすくい角 α_0 になり、すくい面が彎曲しているから、これに沿つて流出する切りくずは当然彎曲するはずである。力学的に見れば、すくい面の彎曲が切りくずに曲げモーメントを与え、チップブレーカの場合と同様にして切りくずを彎曲させるものと考えられる。

2.3 2次流れによる彎曲

延性のある材料の切削では、一般に切りくずは剪断面を通過した後、工具すくい面との摩擦によって、粘性流体の板に沿つての流れにおける境界層の如き速度低下領域を生じ、すくい面に近接した部分に2次流れと呼ばれる塑性変形を起こす。この変形は、事実としては古くから知られているが、従来の切削理論では単純化のために多くの場合無視している。

図5 切りくず生成時の変形
被削材：黄銅， 切削速度：25
mm/min, $\alpha = 30^\circ$, $t_1: 0.28$ mm

図5は側面に格子線を刻んだ黄銅板の2次元切削中の変形を示す写真の1例で、切りくずの自由面側（切りくず厚さの約 $2/3$ ）は剪断面で変形した後は変形せず、図2に示したと同様に最初から一定の曲率を持つて出てゆくことがわかる。これに反してすくい面側では、すくい面に接していた部分は直線で、ここを離れると円弧になり、切りくずのすくい面側約 $1/3$ の部分はすくい面上を移動する間に次第に薄く、従つて高速になつてゆくことがわかる。またこの間に、切削方向と直角に引いてあつた刻線は次第に曲がつて、すくい面方向に傾いてゆく、すなわち2次流れを起こすのが明らかに認められる。

このような2次流れは次の理由で必然的に切りくずを彎曲させることになる。図6で、2次流れのない場合には太線のように変形するのに対して、実際には細線のよ

図6 2次流れによる滞留（概念図）

うに2次流れを起こしたとする。かりに剪断面通過直後には直線であつた刻線0が、1の位置では図のように曲がつたとすると、刻線0と1の間の面積は一定でなければならないから、刻線1の太線と細線の間の三角形の面積 A_1 に相当する面積は前方に押し出されなければならない。同様に刻線1と2の間では面積 $(A_2 - A_1)$ だけ押し出されるはずである。この面積 A は最初急増するが、漸次定常化して、切りくずがすくい面から離れる点以後では増加しなくなる（2次流れが終了する）から、押し出し量は漸減して0になる。

このことは、2次流れによる速度低下領域の存在は、 A の増加量に相当する図6に点線で示すような形の速度0の滞留部分（構成刃先）が存在するのと同等の効果を有することを意味する。この部分をかりに滞留相当部と

図7 彎曲切りくず発生時の変形
（2次流れのある場合）

名付けることとする。これによつて、上記構成刃先による彎曲と同様の理由で、この点線に沿つた曲率を有する切りくずを生ずるはずである。

すなわち、滞留相当部前面が彎曲していることによつて、自由面側の部分は図2のように変形し、これとすくい面側の2次流れを生ずる部分とを組み合わせると図7のような変形を起こすことになり、図5や図8以下の写真と同じ傾向になる。

図7は次のようにして描いた。工具のすくい角 α と切り込み t_1 を与え、切りくずの外半径 ρ_0 、内半径 ρ_i および切りくずとすくい面との接触長さ m を仮定すると曲率中心がきまり、全体の外形がきまる。切りくずの自由面側の2次流れを起こさない領域は、剪断面通過後は変形しないと考えられるから、その領域での刻線の変形は図2と同様にして求められる。一方すくい面側では、切りくずの長手方向の刻線とすくい面との間隔は刃先では広く、切りくずとすくい面との分離点まで漸減するから、これに応じて、ます目の面積が切削前と変わらないという条件をみたすように、横方向の刻線の形を、実験で得られた写真を参照して、適宜にきめた。

横方向の刻線の形は、面積一定の条件だけではきまらず、被削材の加工硬化や温度分布等の複雑な条件を加える必要があると考えられるので、これについては今後研究する予定である。

なお、刃先に近い刻線が変曲点を持つ複雑な形をしているのは、面積一定の条件から必然的に起こること、実際の写真にもこの傾向が認められるのは興味あることである。

3. 実験

3.1 実験方法

2次流れによる切りくずの彎曲に関する上記の考察を実証するために、2次元切削中の切りくず各部の変形状況を観測し、2次流れの進行過程から滞留相当部の曲率半径を求め、これと実際の切りくず曲率半径とを比較する次の実験を行なつた。

被削材：黄銅および銅の板(40×25×2mm)の一面を平滑にペーパー仕上げした上にマジックインキを塗り、ここにサファイア針で縦0.2mm、横0.1mm間隔の格子線を刻む。

バイト：高速度鋼製平バイト。すくい角は10°、20°、30°の3種類。

切削：格子を刻んだ面の変形を完全に2次元的なものにするために、その面の上にもう一枚の同様な被削材をかきね、両者を一緒に万力にくわえてシェーパーまたはフ

ライス盤に取り付ける。この被削材の端面を上記バイトで2次元切削している途中で停止し、被削材を外して拡大写真をとつて格子の変形を調べる。

切削条件：切り込みは0.1~0.5mmの範囲で変化。切削速度は1.8 m/min以下のごく低速に限つた。この程度の低速では切削速度の影響はほとんど認められなかつたので、特別な急停止装置は用いながつた。一般に切りくずの曲率半径は切削開始直後は小さく、次第に増大して定常値に達するが、本実験では手数の関係で切削停止までの切削距離は一定にしなかつた(15~35mm)。従つて下記のデータの一部には、未だ厳密には定常値に達していないものも含んでいる。

3.2 実験結果

上記実験から得られた図8に例示するような写真から

図8 切りくず生成時の変形
被削材：黄銅，切削速度：25mm/min， α ：20°， t_1 ：0.45mm， ρ_0 ：4.5mm， m ：0.8mm

2次流れがないとした場合の各刻線(本実験の範囲ではこれらは直線に近い)およびその延長と、実際に2次流れを起こしている各刻線との差の部分の面積 A を実測し(図6,7参照)、一方2次流れがないとした場合の各刻線の延長とすくい面との交点の刃先からの距離 x をも測定する。これらから A_i と $(x_i + x_{i-1})/2$ ($i=1,2,3,\dots$)註1)との関係を求めてグラフを描くと図9のようになる。すなわち、 A は x の小さい間は急増するが、漸次勾配が減少し、切りくずがすくい面から離れる点付近

註1) x 方向の値をこのようにとることは厳密には正しくないが、 A の測定誤差等を考慮して、簡単のためにこの値を用いた。

図9 すくい面上の移動にともなう A と dA/dx の変化 (図8の写真から求めたもの)

で定常値になる。この曲線を図上で微分して、註2) dA/dx と x との関係の求めると、同図に併記するように大体一つの円弧で表わされる。その円弧の曲率半径を ρ' とすると、これが滞留相当部の前面の曲率半径になる。従つてもし先の考察が正しければこの ρ' と切りくずの曲率半径 ρ_0 (外径) とは等しいはずである。

図10は多くの実験についてこの両者を求めて比較し

図10 滞留相当部前面の曲率半径 ρ' と切りくずの曲率半径 ρ_0 との比較 ($\alpha: 10^\circ \sim 30^\circ$, $t_1: 0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$, 切削速度: 1.8 m/min 以下, 切削距離: $15 \sim 35 \text{ mm}$)

たもので、 $\rho' = \rho_0$ がほぼ成立することが認められる。 ρ_0 の方が ρ' より多少大きいのは、すくい面上での切りくずの弾性変形が、すくい面を離れた後に回復するためと思われる。

なお ρ' を求める際には、変形した刻線のとりかたによつて数十%の巾を生ずるが、ここには中央値が示してある。

註2) A の測定にはかなりの誤差が入るので、 A の値をなめらかな曲線で結び、その勾配を図上で求めて dA/dx を求めた。

以上の方法では、 A と x の値を各刻線について測らねばならず、一部の刻線が不鮮明なために廃棄しなければならぬ写真がかなりあつたので、これらを生かすために、次の方法でも処理してみた。

滞留相当部の全面積 A_s は図6から

$$A_s = A_1 + (A_2 - A_1) + \dots + (A_n - A_{n-1}) = A_n \quad (2)$$

ただし n は2次流れが定常に達するまでの刻線数。

すなわち、図11に示すように、すくい面上を通過し

図11 滞留相当部の面積 A_s

て2次流れを完了した部分における刻線の2次流れによる変形部の面積 A_n は、滞留相当部の全面積 A_s に等しいはずである。2次流れを起こさない部分は剪断面通過後は変形しないとすると、滞留相当部の前面は図のように切りくずの外半径 ρ_0 を半径とする円弧であるはずだから、滞留相当部の面積 A_s は幾何学的に次式で表わされる。

$$A_n = A_s = \frac{1}{6} \frac{m^3}{\rho_0} + \frac{1}{8} \frac{m^4}{\rho_0^2} \tan \alpha + \frac{m^5}{\rho_0^3} \left(\frac{1}{60} + \frac{1}{8} \tan^2 \alpha \right) + \dots \quad (3)$$

ただし m は切りくずとすくい面との接触長さ、 α は工具のすくい角。

実際には多くの場合 $m/\rho_0 \ll 1$ であるから、(3)式右辺の第2項以下を省略すれば、大まかな目安として

$$A_n = A_s \approx \frac{m^3}{6 \rho_0} \quad (4)$$

そこで上の実験で得られた写真から、 A_n 、 ρ_0 および m (切りくずのすくい面側表面の直線部分の長さを測つた) を求めて、 A_n と m^3/ρ_0 の関係を求めると図12のようになつて、かなりバラツキはあるが、ほぼ(4)式が成立することが認められる。

このバラツキの主原因は、 m の測定精度があまり高め

図 12 A_n と m^3/ρ_0 との比較
(切削条件の範囲は図 10 と同じ)

られず、しかもこれを 3 乗するためと考えられる。

3.3 結論

以上の実験から、切りくずの曲率半径と 2 次流れの關係についての 2・3 の考察は、測定誤差の範囲内で正しいことが認められた。

したがって、切りくずの曲率半径 ρ_0 は (4) 式から近似的に次式で表わされる。

$$\rho_0 = m^3 / 6 A_n \quad (5)$$

これから、切りくずの曲率半径を小さくするには、切りくずとすくい面との接触長さ m を小さくし、2 次流れによる変形部の面積 A_n を大きくすればよいことがわかる。

しかし m と A_n が何によつてきまるかについては未だ問題が残されており、この両者は相互に関連を有するものと考えられる。これらについては今後の研究にゆずることとする。

4. 関連した二三の実験結果

上記実験に関連して行なつた黄銅の低速切削 (25 mm/min) で得られた特徴ある実験結果を下に示す。

4.1 切削液の影響

図 13(a) は乾切削の一例であり、(b) は(a)と同じ条件で不水溶性切削液 (寿化学 KK 製 Hi-Cut Insol) を

注いで削つたものである。この場合、曲率半径は後者の方が著しく小さくなつてゐるが、 m は後者の方が小さく、また A_n は少し大きくなつてゐる。(5) 式で m は 3 乗でくことから、切削液によつて接触長さ m が減少したことが主原因となつて、曲率半径が小さくなつたものと解される。

4.2 2 段すくい角の影響

2 段すくい角、刃先の面取り、あるいは竹山氏らの接触長さを強制したバイト等は、切りくずとすくい面との接触長さ m を減らしたり、刃先付近の流れを乱して 2 次流れによる変形部の面積 A を増すから、切りくずの曲率半径を小さくするであろうことが予想される。事実 Chao-Trigger の論文⁹⁾にもそのような事実が報じられている。ところが、実験の結果はそれほど簡単ではなかつた。

図 14 はすくい角 30° のバイトの先端を巾 0.57mm だけすくい角 10° にといで、黄銅を切り込みを変えて削つた場合の変形状況を示す。

まず切り込みの大きい(a)の場合には、すくい角 10° の

(a) 乾切削 $t_1: 0.40\text{mm}$, $\rho_0: 8.5\text{mm}$
 $m: 0.75\text{mm}$, $A_n: 5 \times 10^{-3}\text{mm}^2$
(b) 不水溶性切削液使用 $t_1: 0.44\text{mm}$, $\rho_0: 3.5\text{mm}$
 $m: 0.55\text{mm}$, $A_n: 6 \times 10^{-3}\text{mm}^2$

図 13 切削液の効果 (被削材: 黄銅, 切削速度: 25 mm/min, $\alpha: 30^\circ$)

部分は完全に構成刃先で覆われ、この構成刃先のすくい面の曲率と等しい曲率を持つ切りくずを生じている。この曲率半径はすくい角 10° や 30° の単一すくい角バイトで同様の条件で削つた時よりずっと小さい。この場合には 2 次流れは殆んど認められず、図 2 と全く同様な変形が起こつてゐる。また切削比 r_c は 0.58 という大きな値で、これはすくい角 30° のバイトで同様な条件で削つた時の $r_c = 0.53$ よりも大きい。したがつて、少なく

図 14 2段すくい角バイトによる切削
 被削材：黄銅，切削速度：25 mm/min
 第1すくい面： $\alpha=10^\circ$ ，巾：0.57mm
 第2すくい面： $\alpha=30^\circ$

ともこの場合には，2段すくい角にして切りくず曲率半径が小さくなつたのは，構成刃先が出来たためであることは明らかである。ちなみに，すくい角 10° および 30° の単一すくい角バイトで同様の条件で削つても，構成刃先は全く発生しなかつた。

切り込みを0.21mmに減らした同図(b)では構成刃先は発生せず，2次流れは著しいにも拘わらず完全に直線状の切りくずを生じている。この程度の切り込みでは普通と逆向きに彎曲した切りくずを生ずることすらある。註3)

単一すくい角バイトの場合には，2次流れを起こさない部分が剪断面を通過した後は変形しないためには，滞留相当部の前面は図 11 のようにすくい面に接する円弧でなければならないが，2段すくい角バイトではかかる

図 15 2段すくい角バイトによる滞留相当部と切りくずの形状

註3) その場合には切りくずの先端は必然的に第2のすくい面に接触し，そのために彎曲状態が変化するので，短距離の切削でしかそのような切りくずは得られない。

制約はなくなるから，図 15 のように直線や逆向きの円弧にもなり得るわけである。

図 14 (c) は切り込みを更に減らして0.10mmにした場合でここまで減らすと単一すくい角バイトで切削した場合とはほぼ同様になる。

4.3 刃先鈍化の影響

図 16 は刃先に約0.04Rの丸味をつけたバイトで削つ

図 16 切れ刃の丸味の影響
 被削材：黄銅，切削速度：25mm/min
 $\alpha: 20^\circ$ ，切れ刃の丸味半径：0.04mm
 $t_1: 0.20\text{mm}$

た場合であるが，図 14 (a) の場合と同様に，丸味の部分に構成刃先が存在するのが認められる。したがって，程度に差はあつても，刃先の鈍化はむしろ切削抵抗を減らし，切りくずの曲率半径を小さくする効果を有する場合

があり得ることが考えられる。

5. 結 論

以上の考察と、黄銅及び銅の低速切削実験とから、次のことがわかった。

1. 彎曲切りくずでは、自由面側の部分は上向きに凸な剪断面を通過する際に円弧状に変形し、以後は変形しないことが認められる。

2. すくい面側の部分はすくい面の摩擦によつて、刃先近傍では低速になるから厚く、すくい面上を移動する間に次第に速度を増して薄くなり、すくい面を離れる点付近からは自由面側と一体の回転運動を行なうようになる。すなわち2次流れが完了する。

3. かかるすくい面側の2次流れが、すくい面上に切りくずの一部が滞留したと同様な効果をもたらし、この滞留相当部の前面の曲率半径にほぼ等しい曲率半径の切りくずを生じさせる。

4. 2次流れ完了時の2次流れによる変形部の面積 A_n (図 11)、滞留相当部の面積 A_s 、切りくずの曲率半径 ρ_0 、切りくずとすくい面との接触長さ m 、およびすくい角 α の間には(3)式の関係が存在する。これから近似的に

$$\rho_0 = m^3 / 6 A_n \quad (5)$$

が成立する。

5. 有効な切削液を用いると、 m が減少することが主原因となつて、 ρ_0 が減少する。

6. 2段すくい角バイトによる切削では、第1のすく

い面の巾に比べて切り込みが大きい時には、第1すくい面は構成刃先に覆われ、その構成刃先のすくい面の彎曲に応じて彎曲した切りくずを生ずる。切り込みがこれより小さいある範囲では、構成刃先は発生せず、直線状または逆向きに彎曲した切りくずを生ずる。

以上の研究にあたり、御討議頂いた大越先生はじめ表面工学会の皆様に感謝するとともに、根気を要する実験に協力された横浜国立大学高橋茂君に深く御礼申し上げる次第である。(1961, 7月4日受付)

文 献

- 1) H. Ernst, M. E. Merchant: "Chip Formation, Friction and Finish". Surface Treatment of Metals. ASM. (1941) 335.
- 2) E. K. Henriksen: "Stress Distribution in the Continuous Chip,—A Solution of the Paradox of Chip Curl", Trans. ASME, Vol. 73, No. 4 (1951) 461.
- 3) R. S. Hahn: "Some Observation on Chip Curl in the Metal-Cutting Process under Orthogonal Cutting Conditions" Trans. ASME, Vol. 75, No. 4 (1953) 581.
- 4) 竹山秀彦: "高速切削の研究" 第12, 13報, 精密機械 Vol. 23, No. 4, No. 6, 昭32, p. 140, p. 277.
- 5) 奥島啓式, 人見勝人: "二次元切削における切りくずの彎曲現象" 精密機械, Vol. 25, No. 7, 昭34, p. 320.
- 6) B. T. Chao, K. J. Trigger: "Controlled Contact Cutting Tools". Trans. ASME, Vol. 81 (1959) 139.