切りくず処理に関する研究*

— 切りくずの横向きカールについて —

新 井 実**

Study on Chip Control in Metal Cutting
- On the sideward Curl of Chip -

Minoru ARAI

The sideward curl of chip is one of the factors by which the chip geometry can be determined, and plays a very important part in chip control. In finish cutting, especially, it is important to control the sideward curl of chip for improvement of chip breaking because chip is hardly curled upward. In this paper, the relation between sideward curl radius of chip and cutting conditions are investigated experimentally, and the cause of sideward curl formation is also discussed. Main results are as follows: (1) Sideward curl radius decreases most remarkably as the depth of cut decreases. (2) The effect of corner radius of tool on sideward curl of chip is remarkable when depth of cut is small. (3) The causes of sideward curl formation are the side flow of chip to be formed at the free edge of chip and the interference of the chip to be formed at the corner of tool.

Key words : sideward curl, chip curl, chip disposal, chip control, chip breaking, chip geometry, corner cutting, side flow, metal cutting

1. 緒 言

切りくずの横向きカールは上向きカールおよび流出角とともに切りくずの形を支配する3因子の1つであり¹⁾、折れ易い切りくずを生成させるために重要である。すなわち、上向きカールとともに横向きカールすることによって切りくずは円すい状になり、その回転軸が切れ刃に対して傾き、工具逃げ面での拘束を確実にし折れやすさを促進する。

最近鍛造技術の向上によって、切削代が少なく切込みが小さい仕上げ領域の切削が多くなってきている。この領域ではチップブレイカで上向きカールを与えることは難しく、無理をするとオーバーブレイキングになり易いが、横向きカール半径を小さくできれば切りくず折断性を向上させることができる。したがって、横向きカール半径を小さくするような工具の設計や切削条件の選定はきわめて重要である。

切りくず形状を支配する3因子のうちで、上向きカールの機構や流出角の支配因子の検討はこれまでに広範に行われてきているが、横向きカールについての検討は少ない。中山²⁾は横向きカールの原因として切りくず生成域の自由端部における横流れ (side flow) を指摘した。升田³⁾はこの横流れ量から横向きカール半径が予測できることを示し、Luttervelt⁴⁾は切削幅と被削材の曲率半径の積で横向きカール半径が予測できることを示した。

本研究では、まず通常の切削条件下で鋼を旋削する場合について切削条件と横向きカール半径との関係を調べた。その結果、上記の横流れ効果だけでは説明できない実験事実が判明した。すなわち、切込みが小さい領域ではコーナ半径の影響が大きいこと、通常とは反対方向に横向きカールした切りくずが発生することがある。そこでこのコーナ半径の影響や逆向きカールの原因を明らかにするとともに、横向きカールの支配要因を解明するために黄銅を用いた低速切削実験を行った。

2. 実験方法

実験は切削条件と横向きカール半径の関係を調べるものと横向きカールの原因を調べるものがあるが、ここでは前者の場合について記し、後者については4章で別に記す。

切削は超硬 (P20) のろう付けバイト (チップブレイカなし) を用いて外周長手旋削を行った。バイトは横すくい角、切れ刃傾き角、アプローチ角およびコーナ半径を変えた。被削材は345C焼きならし材 ($\phi 85 \sim 95$) を用いた。切削速度は構成刃先が発生しないことを前提に150m/minで一定とし、切込みと送り量を広範に変えた。これらを合せて切削条件を表1に示す。

切りくずは長くなると工具台などとの接触によってその形が著しく変化する。そこで、図1 (a) に示すように被削材の長手方向に溝を切り、1回転ごとに切りくずを分離するようにした。切りくずは数巻きの円すいらせん状で流出する。これを焼きなまし、さらに延ばすと上向きカールが取り除かれて図1 (b) に示すように横向きカールだけの切りくずになる。この切りくずを投影機で拡

*原稿受付 平成12年10月26日

**正会員 横浜国立大学教育人間科学部 (横浜市保土ヶ谷区常盤台79-2)

Table 1 Cutting condition (standard)

Cutting speed V	150m/min
Depth of cut a	0.5–3mm
Feed rate f	0.05–0.3mm/rev
Normal rake γ_n	-5–30° (0°)
Inclination angle λ	0–30° (0°)
Approach angle ψ	0–45° (0°)
Corner radius r_ϵ	0–0.8mm (0mm)
Cutting fluid	Dry

Fig.1 Work material and measurement method of sideward curl radius

大し、内側のカール半径 R_s および切りくず幅 bc を測定した。切りくずの厚さ hc は管厚マイクロメータでその最大値を測定した。

3. 実験結果

3.1 切込み a および送り量 f の影響

図2 は0Rバイト（コーナ半径 0mm）を用いて切込み a および送り量 f を変えて切削したときの結果である。この図から、切込みが小さいほど、送り量が小さいほど曲率が小さくカール半径が大きいことがわかる。

切りくずが横向きカールするということは切削幅両端部での切りくず流出速度が異なることである。図3のように切りくずの外側および内側の流出速度をそれぞれ V_{co} および V_{ci} とすれば、

$$\frac{V_{co}}{V_{ci}} = \frac{bc + R_s}{R_s} = 1 + \frac{bc}{R_s} \tag{1}$$

である。そこで bc/R_s が切削条件によってどう変わるかを整理してみる必要がある。

図4は図2の結果について bc/hc と bc/R_s の関係を調べた結果である。おおまかにみてほぼ1本の直線で表わされることがわかる。切削速度も変えたが（100～250m/min），その結果も同様

Fig.2 Influence of feed rate and depth of cut on sideward curl $\gamma_n=0^\circ, \psi=0^\circ, \lambda=0^\circ, r_\epsilon=0\text{mm}$

Fig.3 Side ward curl radius and width of chip

Fig.4 Relation between bc/hc and bc/R_s Cutting conditions are same as in fig.3

な整理をすると図4の直線にほぼのることがわかった（図略）。これらのことから通常の切削条件下では下記の関係が成り立つ。

Fig.5 Influence of approach angle on sideward curvature
f=0.2mm/rev, $\gamma_n=0^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $r_\epsilon=0\text{mm}$

Fig.6 Influence of normal rake angle on sideward curvature
f=0.2mm/rev, $\psi=0^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $r_\epsilon=0\text{mm}$

$$\frac{1}{Rs} = \frac{0.7}{bc} - \frac{0.09}{hc} \quad (2)$$

定数0.7および0.09は被削材質，工具形状などで変わると思われる。

3.2 アプローチ角の影響

アプローチ角 ψ を $0\sim45^\circ$ の範囲で変えて切削した。その結果が図5であり、アプローチ角を増大させると横向きカールの曲率は小さくなる。アプローチ角を増大させると切削幅が増大し、切削厚さが減少する。そこでこの結果について bc/hc と bc/Rs の関係を求めてみると図3の直線上にほぼのる。

3.3 すくい角の影響

図6はすくい角 γ_n の影響を調べたものである。この図からすくい角が増大すると曲率が減少することがわかる。すくい角が増大すると切りくずが薄くなるためである。この結果について hc/bc と bc/Rs の関係を求めてみたところ、 γ_n が $-5^\circ\sim+5^\circ$ の範囲の通常の工具ではほぼ図4の直線にのる。しかし γ_n が 15° 以上では図4の直線よりも明らかに下方になる。これは図中に示すようにすくい角の増大によって切りくず生成域でのせん断ひずみ γ_s が著し

Fig.7 Influence of cutting edge inclination angle on sideward curvature
f=0.2mm/rev, $\gamma_n=0^\circ$, $\psi=0^\circ$, $r_\epsilon=0\text{mm}$

Fig.8 Influence of corner radius on sideward curvature
f=0.2mm/rev, $\gamma_n=0^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $\psi=0^\circ$

く減少するためであると考えられる。したがって、式(2)は切りくず生成域でのせん断ひずみの変化が少ない場合にのみ成り立つことになる。

3.4 切れ刃傾き角λの影響

図7は切れ刃傾き角 λ の影響を調べた結果である。横向きカールの曲率は $\lambda=15^\circ$ までは増大し、これを越えると減少する。切れ刃傾き角の増大は横向きカールに対して次の2つの相反する影響を与える。

- (a) 有効すくい角が増大し、横向きカールの曲率を減らす。
 - (b) 横流れを促進し、横向きカールの曲率を増やす。
- これら両者の兼ね合いで横向きカールの曲率が決まる。切れ刃傾き角が 15° 以上では図中に併記したように有効すくい角が増大が顕著であり、その結果横向きカールの曲率が減少するものと思われる。

3.5 コーナ半径 r_ϵ の影響

以上の実験はすべてコーナ半径が0mmのバイトを用いた場合の結果である。図8はコーナ半径の影響を調べた結果である。全般的

Fig.9 Side ward curvature in cutting with modified tool
 $f=0.2\text{mm/rev}$, $\gamma_n=0^\circ$, $\lambda=0^\circ$

Table 2 Cutting conditions on the origin of
 sideward curl

Work material	6-4brass
Tool material	High speed tool steel
Rake angle	10°
Cutting width	2mm
Undeformed chip thickness	0.2mm
Cutting speed	1.7m/min
Cutting fluid	Dry

にみて、コーナ半径が小さいほど曲率が大きく横向きにカールしやすいが、切込みにに対して複雑に変化する。すなわち、

- (a) $a > 3r_\epsilon$ ではコーナ半径の影響が少ない。
- (b) $a < 2r_\epsilon$ では切込みが小さくなると曲率が減少する。
- (c) $a = (1 \sim 1.5)r_\epsilon$ で曲率が最小になる。
- (d) 逆方向（曲率が負）へカールする場合がある。

このような横向きカールの複雑な変化は図9中に示す2段アプローチ角の工具で切削した場合でも同様な結果が得られる。この工具はコーナ半径を直線に置き換えたものである。切込みが1～2mmにおいてコーナ半径の場合と同様に逆向きにカールする。

4. 横向きカールの原因と支配因子

4.1 横向きカールの要因

切りくずが横向きにカールするということは切削幅上でその流出速度が変化することである。ドリル加工では切れ刃に沿って切削速度が変わるから、明らかにこのことが横向きカールの主要因である。他の大部分の切削では切削幅上でその切削速度の変化は少ないから、切削比が変化することがその要因になるはずである。

中山²⁾は自由端部において横流れが起こることが横向きカールの要因であることを指摘した。しかし、このことだけでは図8で示したようなコーナ半径による横向きカールの曲率の複雑な変化は説明できない。図3中に示す切削自由端部 (A) の横流れだけでは

Fig.10 Effect of undeformed chip section on sideward curvature

Fig.11 Effect of apex angle in cutting with V-shaped tool on cutting ratio

なく、工具先端部 (B) にもその要因（“コーナ切削効果”と呼ぶこととする）があると推定し以下の実験を行った。

ここでの実験は横向きカールの機構を観察しやすくするために黄銅の板材をフライス盤のテーブル送りをを用いた低速切削を行った。切削諸元を表2に示す。

4.2 横流れ効果とコーナ切削効果

図10は切削幅 (2mm) と最大切削厚さ (0.2mm) を一定とし、切削部形状を図中に示すように種々変えて切削したときの横向きカールの曲率である。左ほど横流れ効果が少なくなるように表してある。左端は横流れが極めて少ないと考えられる場合であり、右端は横流れ効果だけである。ほかの場合は横流れ効果とコーナ部切削効果の両者が重畳されていることを示している。通常の切削は真ん中の場合であり、最も曲率大きい。

中山が示した横流れ効果の説明は図中の右端 (○) に示したような2枚の重ね板を切削するとき切りくずが左右にカールすることから指摘したものである。重ね板切削の場合と右端の三角形断面を切削する場合で曲率はほぼ等しい。これらの結果から切削端部における横流れ効果よりもコーナ切削の効果の方が明らかに大きいことがわかる。

4.3 コーナ切削の切削比

切削自由端部の横流れはこの部分の流出速度を低下させる。一

方、コーナ部の切削はこの部分の流出速度を増大させているものと考えられる。このことを確かめるためにV字形工具を用いてV溝切削を行い切削比を調べた。その結果が図11であり、2次元切削($\theta=180^\circ$)に比べてV溝切削の切削比は大きく、先端角が小さいほど切削比が大きいことがわかる。

V溝切削の切削比が大きくなることはArmarego⁵⁾によって指摘されている。その原因はそれぞれの切れ刃に直角方向に切りくずが流出しようとする結果、お互いに押し合うためであると推定しているが理論的な裏付けは明確ではない。

4.4 横向きカールの支配要因

横向きカールの原因は切削幅自由端における横流れ効果と切れ刃先端のコーナ切削効果の2つがあると考えられる。前者は流出速度を低下させ、後者は流出速度を増大させる。切削幅両端でこれらの効果があっても切りくずは一体で流出しなければならないから、切削幅上で一定の流出速度勾配をもって流出することになる。したがって切削幅が広ければ流出速度勾配は小さくなる。

切りくずの厚さが厚ければ横流れ効果もコーナ切削効果も大きくなるから流出速度勾配が大きい。すくい角の増大は横流れ効果およびコーナ切削効果を減少させる。また切れ刃傾き角を増大させると横流れ効果を増大させる。

コーナ半径が大きい工具による切削ではこのコーナ切削の効果が分散するために横向きカールの曲率は小さい。切込みがコーナ半径よりわずかに大きい場合は曲線部と直線部の境界がコーナ(角部)に相当する結果、逆向きカールが発生することがあるものと思われる。

これらのことは3章で示した実験結果と定性的に対応する。

4.5 逆方向の横向きカール

3.3 および 4.4 節において刃先側への横向きカール(“逆向きカール”と呼ぶ)が存在することを示した。この逆向きの横向きカールは仕上げ面へのカールであるが、通常は上向きカールが加わることによって仕上げ面、あるいは工具へ衝突することなく円すいらせん形の連続切りくずとなる。

図12は円すいらせん形切りくずの発生機構を示したものである。正方向の横向きカール($Rs>0$)は切りくずの回転軸が切れ刃より下方になる¹⁾結果、工具逃げ面で拘束されて折断にいたるものが多い。これに対して逆向きカール($Rs<0$)は切りくずの回転軸の傾きが上方になるから、工具の拘束を受けない。その結果連続らせん形切りくずが発生する。

一般に切込みを小さくすれば切りくず折断性は向上する。しかし、切込みをコーナ半径よりも小さくすると連続のらせん形切りくずが発生することがある²⁾。この切りくずの横向きカールの方向を調べると逆向きカールである。

(a) $Rs>0$

(b) $Rs<0$

Fig.12 Difference of chip geometry due to difference of direction of side ward curl

6. まとめ

通常の切削条件下での鋼の切削を行うとともに黄銅の低速切削を行った。その結果次のことが判明した。

(1) 横向きカールの曲率は

- ・切削幅が小さいほど
- ・切削厚さが厚いほど
- ・すくい角が小さいほど
- ・アプローチ角が小さいほど

大きい。

(2) コーナ半径を増大すると横向きにカールしにくくなる。

(3) 切込みが小さい場合にコーナ半径の影響が顕著であり、切込みがコーナ半径の2倍以下の領域では切込みに対して横向きカール半径が複雑に変化する。

(4) 通常は自由端側へのカールであるが、これと逆な方向への横向きカールが存在する。

(5) 横向きカールの原因は横流れ効果のほかにコーナ切削効果があり、後者の効果の方が影響が大きい。

参考文献

- 1) 中山一雄：切りくず形状の幾何学，精密機械，38，7 (1972) 592.
- 2) K.Nakayama：Origin of Chip Curl in Metal Cutting, Bull. JSPE, 6, 3 (1972) 99.
- 3) 升田雅博，中条義輝，原 利雄，王 詩堯：切りくず処理に関する研究 (第2報) Sideflowからみた切りくずカールの推定，精密工学会誌，53，4 (1987) 558.
- 4) C.A.Van Luttervelt：Chip Formation in Metal Cutting at Small Diameter, CIRP Ann., 25,1(1976)71.
- 5) E.J.A.Armarego：Machining with double cutting edge, J MTDR,7 (1967)23.
- 6) 中山一雄，李 振加，新井 実：チップブレイカの切りくず折断性能 (第1報) チップブレイカの有効範囲，精密工学会誌，53，7 (1987) 1033.