フライス切削のバリ生成に及ぼす縦すくい角の影響*

橋 村 雅 之** David A. Dornfeld***

Effect of Axial Rake Angle on Burr Formation in Milling

Masayuki HASHIMURA and David A. DORNFELD

Burr formation in milling is a three dimensional deformation. Burr formation is different from deformation in continuous cutting. In burr formation on exit surfaces of workpieces, the continuous cutting before burr formation is considered to be an initial condition of burr formation and plastic deformation of workpiece edge formed by the tool exit is burr. Therefore, the continuous cutting and deformation by tool exit have effect on burr formation. To clarify the effect of these factors on burr formation, burrs created with various axial rake angle of the tools and cutting conditions were observed. To represent the state of the continuous cutting, the chip flow angle calculated with cutting conditions was used. To represent the deformation type at the workpiece edge, exit order of cutting edges calculated with the geometry of the tool and workpiece edges was proposed. These chip flow angle and exit order are used for understanding the burr formation in milling. To vary the chip flow angle and exit order, depth of cut, feed and axial rake angle of tools were varied. As the results, it was verified that deformation formed in continuous cutting and tool exit has effect on burr size in face milling. As the chip flow angle increased, the exit burr thickness decreased and side burr thickness increased. As the axial rake angle decreased, the exit burr thickness increased with effect of the exit order. These chip flow angle and exit order are considered to be important factors on burr formation in milling.

Key words: burr formation, metal cutting, milling, axial rake angle, chip flow angle, exit order

1. 緒 言

フライス切削は三次元切削であり、工具形状とその動作が二次元切削や旋削に比べて複雑である。そのためばりの形状も多様かつ複雑である。二次元切削ではばりの切削機構や生じる形状に関して研究されてきているが^{1)・2)}、その結果をフライス切削には容易に適用できない。その理由はフライス切削には切れ刃が複数存在し、幾何的因子が三次元的なためと考えられる。

フライス切削の切削挙動は複雑で、切りくずは複数の切れ刃による被削材の変形/分離によって生成されと考えられ、ばりも被削材端面における被削材の変形/分離の痕跡と考えることができる。またばり生成の初期状態は定常切削状態であることから、切りくずとばりの生成挙動は密接な関連があると考えられる。

フライス切削時のばり形状、寸法と切削条件の関係についてはフライス切削実験で切削条件を系統的に変化させて調査されてきた^{3)・4)}。しかしフライス切削では変化させるべき切削条件が多い上に、被削材の幾何形状や工具形状が多様多様にわたるため、ばり生成機構や形状、寸法の傾向を系統的に整理することはきわめて困難である。

切込み量の増大や工具摩耗によって被削材の工具周辺での変形領域が大きくなれば、生成されるばり寸法も大きくなることは経験的に知られている。フライス切削の場合、これに加えて切れ刃が複数あるために、それらで生じる変形領域の相互関係がばり生成機構を複雑にしている一因と考えられる。

また変形の大きさだけでなく、被削材端部がどのように変形

するかという変形形態もばりの寸法と形状を決定づける重要な要因である。Gillespie ら⁵⁾や筆者⁶⁾も同様に、転回 (hinged) やせん断 (shear) によるばり生成を観察している。この転回とせん断は工具形状、被削材端部形状と切削条件に支配される。フライス切削では工具のそれぞれの切れ刃が離脱する順番 (工具離脱順位) がばり生成時の変形形態を支配すると考えられる⁶⁾。

そこで本研究ではフライス切削における定常切削における切りくず流出挙動と工具形状と切削条件の関係から複数の切れ刃によって生じる複雑なばりの形状を工具刃先周辺の変形領域と変形形態の観点から系統的に整理することを試みる。

2. フライス切削のばり生成機構

2.1 二次元切削におけるばり生成機構

フライス切削のばり生成に関する影響因子を明確にし、本研究を理解しやすくするために二次元切削における基本的なばりの生成機構を要約する。

図1に二次元切削のばり生成機構を示す。二次元切削における出口ばり (exit burr) のばり生成の初期状態は定常切削状態で、刃先近傍には切りくず生成に伴う変形領域が広がっている。工具が出口面に近づくと刃先近傍に定常的に形成されていた変形領域は拘束されていない自由面としての出口面の影響をうけて変形領域が出口面側にひずむとともに、出口面には塑性変形領域が工具近傍の変形領域から離れて生じる。この離れた変形領域はばり生成時には pivoting point と呼ばれ、材料の転回の軸のように見える。この軸の位置は定常切削時の工具近傍の変形領域が大きいほど切削面から離れた位置に生成され、結果として大きなばりを生成する。工具の進行にとまない、この出口面の変形領域と工具近傍の変形領域が合体、負のせん断域を形成する。

* 原稿受付 平成10年5月6日

** 正会員 新日本製鐵(株)室蘭技術研究部(室蘭市仲町12)

*** 正会員 Univ. of California, Dept. of Mech. (Berkeley, CA94720 USA)

Fig. 1 Schematic illustration of typical burr formation process

工具が出口面に近づくと 切りくずの分離が生じ、分離位置が切削面より上方（切りくず側）であれば通常のばりが、切削面より下方であれば breakout(負のバリ)が生成する。breakout 時にもクラックは負のせん断域に沿って伝播するため breakout の大きさも pivoting point の加工面からの距離に比例する。このようにばりの大きさは定常切削時の工具近傍の変形領域の大きさの影響を受けると考えられる。

2.2 複数の切れ刃で生じる変形領域

次にフライス切削におけるバリ生成機構を考える。図2に典型的なフライス切削を示す。フライス切削では多くの位置にばりを生じるが、出口面に関して考えると出口ばり (exit burr) と側面ばり (side burr) の2種類が考えられる。二次元切削では切りくずは工具すくい面に沿って、加工面から遠ざかる方向に離脱し、その結果生じる出口面上のばりは工具の進行方向に成長す

Fig. 2 Tool motion and location of burrs in face milling
For sharp nose tools Fig. 3 Definition of chip flow angle (Colwell et al.⁷⁾) (a) Chip flow angle λ is small (b) Chip flow angle λ is large

る。フライス切削では工具が被削材を切削して一度通過すると、多くの場合、複数の切れ刃によって複数の加工面を創成しながら、1つの切りくずを生成する。Colwell らはこのような複数の切れ刃で生じる切りくずの流出挙動を切りくず流出角 (chip flow angle) で整理した⁷⁾。それによれば、切りくず流出角は近似値を与える経験則ではあるが、切削抵抗と密接に関係している。切削抵抗は被削材の変形に要する負荷であるから、切りくず流出角が工具近傍の変形領域と関係することを示唆している。そこでこの切りくず流出角を複数の切れ刃で生成された変形領域の相互関係を表す指標として用いることとした。

図3に Colwell らによって示された切りくず流出角の定義を示し、工具ノーズ半径が小さい場合の切りくず流出角の導出式を式(1)に示す。また図4にこの切りくず流出角と被削材の変形領域の関係を示す。このバリ生成時の切りくず流出角を用いて主切れ刃と副切れ刃によって作られる変形領域の大きさの比率が推測でき、それぞれの切れ刃によって生成された変形領域を切りくず生成に支配的で大きな変形領域 (主変形域 major deformation zone) と補助的で小さな変形領域 (副変形域 minor deformation zone) とに分けることができる。主変形域は切りくず流出方向に相対する方向に生成されると考えられる。

$$\lambda = \arctan \frac{d}{f + d \tan \gamma} \left(\frac{1 + \sin \beta}{1 + \sin \alpha} \right) \quad (1)$$

ここで λ : 切りくず流出角, d : 切込み, f : 一刃あたりの送り量, α : 縦すくい角, β : 横すくい角, γ : 切込み角である。

このようにバリ生成時の被削材端部の変形領域を切りくず流出角から考えることで、同一の加工能率 (切り取り断面積 $d \times f$) でも被削材との幾何的な関係から出口ばりと側面ばりのいずれが成長しやすいかを推測できると考えた。

2.3 バリ生成における変形形態

このような変形領域の大きさや分布だけでなく，バリ生成時の変形形態によってもばりは影響されると考えられる．これまで観察されている転回とせん断という2つの変形形態のいずれがバリ生成に支配的になるかは，以下に説明する被削材端部からの切れ刃の離脱順位によって異なると考えられる．

図5(a)に出口面近傍での工具と被削材の幾何的な関係を，(b)，(c)に切れ刃離脱時に生じる2種類の変形形態を示す．図5(a)中 ϕ は平面出口角， w はバリ生成時の切取り厚さで，他の記号は式(1)と同様である．図5(a)に示す切れ刃上の点AおよびCに注目する．Aは工具/被削材の幾何的に計算される接触面の副切れ刃上のコーナーの点であり，Cは主切れ刃上のコーナーの点である．実切削では被削材の変形により，幾何的に計算されるよりも工具と被削材の接触面は大きくなるが，本研究では簡単のため，被削材の変形を無視して示す．

工具が被削材端面から離脱する際，AがCより先に離脱する場合，図5(b)に示すように主切れ刃はせん断によって出口ばりを形成し，転回によって側面ばりを形成すると考えられる．逆にCがAより先に離脱する場合には図5(c)に示すように側面ばりはせん断により，出口ばりが転回によって形成されとされる．BがA，Cに先駆けて離脱する場合も，基本的には最も遅く離脱する切れ刃が転回によるばりを形成すると考えられる．

この離脱順位を上記A，B，Cを用いた単純な幾何学的な関係から予測する．図6にフライス切削の切削条件，平面出口角(in-plane exit angle)，主軸位置および被削材出口面の幾何的な関係を示す．ここでOは主軸位置である．被削材端面に平行に主軸を送る場合，主軸から被削材端面までの距離 L ，平面出口角 ϕ ，切削速度(主軸回転速度 ω)および図5(a)の工具/被削材接触面に関する幾何的な関係を用いて工具離脱順位を計算する．O-O'を工具先端Bが通過する初期時間 $t=0$ から工具のA，B，Cの各点が被削材端面を離脱するまでの時間をそれぞれ t_A ， t_B ， t_C とするとそれぞれ式(2)，(3)，(4)に示すことができる．

$$t_A = \frac{1}{w} \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{L \cos \beta}{\sqrt{w^2 + R_B^2 \cos^2 \beta - 2R_B w \cos^2 \beta}} \right) + \sin^{-1} \left(\frac{w \sin \beta}{\sqrt{w^2 + R_B^2 \cos^2 \beta - 2R_B w \cos^2 \beta}} \right) \right\} \quad (2)$$

$$t_B = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left(\frac{L}{R_B} \right) \quad (3)$$

$$t_C = \frac{1}{\omega} \left[\cos^{-1} \left(\frac{L}{\sqrt{(R_B + d \cot \gamma)^2 + d \tan \alpha}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{d \tan \alpha}{R_B + d \cot \gamma} \right) \right] \quad (4)$$

ここで R_B ：切れ刃先端Bの回転半径， α ：縦すくい角， β ：横すくい角， γ ：横切れ刃角， d ：切込み量， ω ：主軸回転速度， w ：被削材端部における切取り厚さである．これによりA，B，C各点の離脱順位が計算できる．実切削では切りくず生成に先だって被削材は変形するので理想的幾何条件で決まるより広い面積で工具と被削材が接触し，計算通り工具各点は離脱しないものの，ほぼ変形形態を予測できると考えられる．

本研究では以上のような検討結果を基に，工具の縦すくい角

(a) Geometric relationship

Fig. 5 Exit order and burr formation process

Fig. 6 Geometric relationship between milling cutter and cutting condition.

と切削条件を変化させることで，切りくず流出角と工具離脱順位を変化させ，そのバリ寸法と形状に及ぼす影響を検討する．

3 実験方法

3.1 切削条件

表1に切削条件および工具形状を示す．工具材料は高速度鋼，工具ノーズ半径は $20 \mu\text{m}$ 以下と小さくした．被削材は $19 \times 19 \times 53\text{mm}$ のステンレス304Lブロックである．平面出口角は 90° ，切削速度は 80m/min とした．工具離脱順位を変化させるために，工具の縦すくい角を変化させ，切りくず流出角を変化させるために切込み量と送りを変化させた．正のすくい角を有する工具は副切れ刃から，負のすくい角を有する工具は主切れ刃から離

脱する。切削条件は被削材端部における切り取り断面積 ($d \times f$) が同じになるように設定した。すなわち、切りくず流出角を小さくする場合には送り $f = 0.5 \text{ mm/rev}$ 、切込み量 $d = 0.1 \text{ mm}$ 、逆に切りくず流出角を大きくする場合には送り量 $f = 0.1 \text{ mm/rev}$ 、切込み量 $d = 0.5 \text{ mm}$ とした。

Table 1 Cutting conditions and tools

No.	Cutting condition			Tool
	Feed rate mm/tooth	Depth of cut mm	Cutting speed m/min	
1	0.5	0.1	57	-15, -5, 0, 15, 30
2	0.2	0.25		-15, 0, 15
3	0.1	0.5		-15, 0, 15

3.2 評価項目

図7に本実験における切削方法を示す。同一条件で3段の切削をおこない、それぞれの出口ばりの厚さと高さおよび側面ばりの厚さを測定した。また定常切削時の変形領域の大きさを推定する手段として、切りくずを採取し、その体積および切りくず厚さを測定した。切りくず体積は30個の切りくずの重量を測定することで評価し、切りくず厚さは光学顕微鏡で測定した。切りくず厚さの測定位置は工具離脱時の位置に対応すると考えられる位置、すなわち切りくず端部の厚さを測定した。なお送り 0.2 mm/rev 、切込み量 0.25 mm の場合はその切り取り断面形状が正方形に近く、切りくず厚さの定義が曖昧なため測定しなかった。

4. 実験結果と考察

4.1 切りくず流出角と工具離脱順位

図8に本研究の切削条件に関して、縦すくい角と Colwell の近似法によって計算した切りくず流出角の関係を示す。縦すくい角を変化させると、その影響で切りくず流出角が変化する可能性があったが、計算の結果、切りくず流出角は各切削条件ごとにほぼ一定で、工具の縦すくい角の影響は小さいと推定された。また工具離脱順位については、本実験のように平面出口角が 90° では、縦すくい角が負の時 A, B, C の順に、正の時 C, B, A の順に工具刃先が離脱することが容易に理解できる。

4.2 切りくず流出角の変形領域に及ぼす影響

図9に縦すくい角 0° の工具で切りくず流出角を変化させた場合に生じた出口ばりおよび側面ばりを示す。縦すくい角 0° では工具切れ刃 A, B, C はほぼ同時に離脱し、工具離脱順位の影響は小さいと考えられる。(a)は切りくず流出角が小さな場合、(b)は大きな場合である。変形領域の大きさはばりの大きさ、特に厚さに反映されるはずである。切りくず流出角が小さな(a)の場合、出口ばり側が主変形域側になると考えられる。そのため出口ばりと側面ばりの厚さを比べると出口ばりのほうが厚かったと考えられる。逆に切りくず流出角が大きな(b)の場合、側面ばり側が主変形域側となり、大きな側面ばりが生成したことがわかる。このように切りくず流出角は定常切削状態での変形領域を表わすとともに、ばりの大きさとも関係があると考えられる。

Fig. 7 Burrs measured on samples

Fig. 8 Calculated chip flow angle

Fig. 9 Effect of continuous cutting on shape of exit and side burr
(Note: A, B, C on tool exited simultaneously.)

Fig. 10 Effect of axial rake angle on burr size in face milling

4.3 バリ寸法に及ぼす縦すくい角の影響

図 10 に出口バリと側面バリの寸法に及ぼす縦すくい角の影響を示す。測定された寸法は 出口バリの高さおよび厚さおよび 側面バリの厚さである。(a), (b), (c)はそれぞれ切りくず流出角が小さな場合、中間の場合、大きな場合の測定結果で、図中に工具切れ刃上の点 A と C の離脱順位を示した。(a)切りくず流出角が小さな場合には側面バリがさらに上面の出口バリと重なるために出口バリと側面バリの区別がつかず、その寸法を測定できなかった。

切りくず流出角が大きな場合には縦すくい角が小さいと工具離脱順位が C → A であり、出口バリの厚さおよび高さは 0.2mm 程度である。縦すくい角が大きくなり、工具離脱順位が A → C と変化すると出口バリの寸法は小さくなった。

切りくず流出角が中間の場合、切りくず流出角が小さな場合と同様、縦すくい角が小さいと縦すくい角の大きな場合より 出口バリの厚さおよび高さが大きかった。それとは逆に側面バリ厚さは縦すくい角の増加にともなって大きくなった。

切りくず流出角が大きな場合も切りくず流出角が小さな場合と同様、縦すくい角が小さいと縦すくい角の大きな場合より 出口バリの厚さおよび高さが大きかった。また側面バリ厚さは縦すくい角の増加にともなって大きくなった。それらの傾向は工具離脱順位が変化する縦すくい角 0° を境にして顕著に変化した。また同一の縦すくい角で比較すると、出口バリの高さおよび厚さは切りくず流出角の増加にともなって小さくなり、逆に側面バリ厚さは大きくなった。

4.4 定常切削時の変形領域

上述のように 定常切削時の変形領域について切りくず流出角で議論してきた。しかし変形領域は 切込み量の大きさなどの切削条件の諸量の大きさの影響を受ける。厳密に言えば縦すくい角の変化によっても変形領域が変化する。そこで本実験では変形領域に及ぼす縦すくい角の影響を検討するために切りくずの体積および厚さを調べた。工具による塑性変形量や 切りくず分離位置が異なり、工具周辺の変形領域の大きさが大きく異なると切りくず体積や切りくず厚さは大きく変化すると考えられる。

図 11 に各切削条件で得られた切りくずの体積測定結果を示す。幾何的な工具と被削材の干渉量から計算した被削材除去量を破線で示す。切りくず体積は縦すくい角 0° 付近で最大であったが、基本的には縦すくい角が変化しても 0.9mm^3 程度でほぼ一定で

Fig. 11 Chip volume formed with various conditions.

Fig. 12 Chip thickness formed with various conditions.

あった。これにより縦すくい角の変化により大きく切削挙動は変化しなかったと考えられる。

図 12 に送り 0.1mm/rev と 0.5mm/rev の場合の縦すくい角と切りくず厚さの関係を示す。送り 0.5mm/rev の場合、ほぼ一定の切りくず厚さであった。0.1mm/rev の場合、縦すくい角 0° の場合が最も大きかったが、縦すくい角の変化に対して同一傾向で変化していないことから、切りくず厚さ 0.2~0.3mm 程度でほぼ同様の切削挙動で被削材が除去されたと考えられる。

以上のことから、縦すくい角の変化に伴う変形領域の大きな変化はなく、本実験で得られたバリの大きさは主に切りくず流出角と工具離脱順位により影響を受けたと考えられる。

5. 結 論

フライス切削において、切りくず流出角と工具離脱順位の観点からバリ生成機構を検討するために縦すくい角と切削条件を変化させて切削し、その時生じたばりの寸法を測定した。その結果、以下のような知見を得た。

- (1) 縦すくい角が増加すると、出口ばりの高さおよび厚さは減少した。切りくず流出角がほぼ同じ場合にはせん断型の変形で生成したばりより転回型で生成したばりの方が大きかった。
- (2) 同一の縦すくい角の工具で切削した場合、切りくず流出角が増加すると出口ばりの厚さは減少した。それとは逆に側面ばりの厚さは増加した。これらの結果から連続切削における主変形域側が副変形域側より大きなばりを生成すると考えられる。
- (3) 本実験で用いた切削条件や工具の違いでは微視的な変形挙動の違いはそれほど大きくなかった。このことから切りくず流出角と工具離脱順位によってフライス切削におけるバリ生成機構を表現できると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 岩田一明, 上田完次, 奥田孝一: 走査型電子顕微鏡直接観察によるバリ生成機構の解析, 精密機械, 48, 4 (1982) 510.
- 2) M. Hashimura and D. A. Dornfeld: Analysis of Burr Formation Mechanism in Machining Process, SME Technical Papers(1995) MR95-178.
- 3) W. Kishimoto, T. Miyake, A. Yamamoto, K. Yamanaka and K. Takano: Study of Burr Formation in Face Milling -Conditions for the Secondary Burr Formation-, Bull. Japan Soc. Prec. Eng., 15, 1 (1981) 51.
- 4) K. Kitajima, T. Miyake, A. Yamamoto, Y. Tanaka and K. Takazawa: Study on Mechanism and Similarity of Burr Formation in Face Milling and Drilling, Tech. Reports of Kansai University, 32 (1990) 1.
- 5) L. K. Gillespie and P. T. Blotter: The Formation and Properties of Machining Burrs, Trans. ASME, J. Eng. Ind., Ser. B98, 2, Feb. (1976) 66.
- 6) M. Hashimura, J. Hassamont and D. A. Dornfeld: Effect of In-Plane Exit Angle and Radial Rake Angle on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation, Manuf. Sci. Eng., ASME 1995 MED Vol. 2-1 (1995) 203.
- 7) L. V. Colwell and A. Arbor: Predicting the Angle of Chip Flow for Single-Point Cutting Tools, Trans. ASME, 76, Feb. (1954) 199.