正面フライス加工におけるバリ生成に関する研究（第1報）*

——バリ生成条件と生成機構について——

三宅輝明** 山本章裕*** 岸本和一郎** 山中啓市† 高野乾輔††

Study of Burr Formation in Face Milling (1st Report)
—Conditions and Mechanism of Burr Formation—

Teruaki MIYAKE, Akihiro YAMAMOTO, Waichiro KISHIMOTO,
Keiichi YAMANAKA and Kensuke TAKANO

The formation of burrs in face milling of plain carbon steel (S 45 C normalized to 179 HB) is investigated in connection with cutting conditions. Two types of burrs are observed. One is named a primary burr, which has the height nearly proportional to depth of cut. Another is a secondary burr, which is smaller than the primary burr because of separation of a tip of the burr during the burr formation process. Large depths of cut and small tool disengagement angles lead to the secondary burr formation, and cutting under these conditions can be one of methods for minimizing burrs. Although the component of cutting forces in the normal direction to the edge is thought to produce burrs, the measurement of cutting forces at the tool disengagement indicates that the component in the feed direction plays an important role in the secondary burr formation.

Key words : burr formation, cutting condition, face milling

1. 緒 言

切削加工において生成されるバリは、その後の加工工程や組立工程において作業の障害となるはかりでなく、種々のトラブルの原因ともなるので、すみやかに除去されるべきである。加工という観点からのバリ対策には、①バリ生成後に何らかの手段でそれを除去する方法と②バリを生成しない加工技術を開発する方法が考えられる。

従来、バリに関する研究は主として前者の除去技術の研究、特にその自動化の研究・開発が行われてきた。しかし加工物の形状、寸法、精度、材質を考えた

場合、自動的にそれらを除去することができない場合も多い。

一方、加工中に発生するバリを抑制または発生させない加工条件を見いだす研究やバリ生成機構に関する研究では、筆者の一人が行った外周旋削に関する研究¹⁾があるが、そのような研究は少なく、かつ十分ではないようである。

そこで、本研究では、正面フライス加工において加工条件や工具形状の選定によるバリの形態の変化を調べるとともにバリの生成機構に検討を加え、バリの生成を減少させるような加工条件を明らかにする。

2. 実験方法

実験には、7.5 kW の数値制御装置付立フライス盤を用い、乾式切削を行った。

正面フライス加工においては、図1に示すように送り方向では工具食付き側と工具離脱側端面に、切削方向では工具離脱側端面にバリが生成され、その形態は切削方法のタウンカット、アップカットでも異なる。しかし一般に、正面フライス加工で問題となるバリは形状が大きく、除去が困難な切削方向の工具離脱側端

* 原稿受付 昭和60年12月12日、昭和55年度精機学会春季大会学術講演会(昭和55年3月30日)および昭和56年度精機学会春季大会学術講演会(昭和56年3月29日)にて発表

** 正会員 兵庫県立工業試験場(神戸市須磨区行平町3-1-12)

*** 正会員 兵庫県機械金属工業指導所(現、兵庫県立工業試験場)

† 正会員 兵庫県機械金属工業指導所(三木市平田字フケ240-1)

†† 正会員 ギャレットターホ(東京都板橋区新河岸2-19-12)

Fig. 1 Burrs produced in face milling

Table 1 Tool geometry

No.	CA	AR	RR	TR	NR
1	25	8	0	3.4	1.0
2	25	7	-6	-2.5	1.0
3	25	-6	-6	-7.95	1.0
4	45	8	0	5.67	1.0
5	45	7	-6	0.72	1.0
6	45	-6	-6	-8.45	1.0
7	75	8	0	7.73	1.0
8	75	7	-6	5.22	1.0

CA; Corner angle °

AR; Axial rake angle °

RR; Radial rake angle °

TR; True rake angle °

NR; Nose radius mm

Fig. 2 Definition of burr dimensions

面に生成するものであり、本研究では、このバリについて検討した。また切削方法としては工具離脱側端面においてはダウンカットの場合が多いのでアップカットの場合はとりあげなかった。

2.1 バリの寸法と測定方法

図2に本研究で検討する2種類のバリの代表的な断面形状を示す。(a)と(b)を比較すると、(b)は(a)の一部が分離したものであることがわかる。そこで本研究では、(a)のようなバリを1次バリ、(b)のような1次バリの一部が分離して小さくなったバリを2次バリと名づけた。

バリの寸法の定義として、バリの高さは工具離脱側端面からバリの先端までの長さとし、バリの根元厚さは切削面から被削材端面がバリ生成によって変形を受けた所までの幅とした。また(a)のような形状のバリでは先端の最も厚い所の寸法を最大厚さとし、被削材端面に近い部分で最も薄い所の寸法を最小厚さとした。

バリの測定として、バリの高さはダイヤルゲージ（最小目盛0.01 mm）を使用し、バリの先端上を走査させて測定した。最大厚さ、最小厚さ、根元厚さは生成したバリ近傍をシリコンゴムで凝固させ、それをスライスし万能投影機（最小目盛0.01 mm）上で50倍に拡大して測定した。

また工具が被削材に対してあるディスエンゲージアングル*（図1の θ を参照。以下、DEAと書く）をもって離脱する瞬間の切削力を求めるため、フライス用切削動力計を用いて切削力の3分力を測定した。

2.2 工具形状と切削条件

工具は超硬P25相当のろう付けチップで、直径100 mmのカッターボディ（住友電工製マイスカッター）に取り付けて使用した。

工具形状としてはノーズ半径を1.0 mm一定とし、横切れ刃角（以下、CAと書く）ならびにすくい角を表1に示すようにした。使用工具は工具摩耗の影響をできるだけ除外するため、逃げ面摩耗幅 $V_B=0.07$ mm以下で、新しい工具と交換した。

切削速度は $V=132$ m/min一定とし、送り、切込み、DEAを変化させ実験した。

通常、鋼用の直径100 mmのカッターの場合、工具刃数は4枚であるが、予備実験の結果4枚刃と1枚刃においてバリの生成条件とバリの形態に差異が認められなかったので、1枚刃で実験を進めた。

2.3 被削材

被削材は焼きならしを施した機械構造用炭素鋼（S45C, HB179）の角材（長さ200 mm、幅100 mm、厚さ35 mm）を6面総研削したもので、マシンバイスに固定する際に、工具の運動に対する被加工面の平行度が1/100 mm以内になるようにして実験を行った。

* 正しくはDisengagement angleあるいはExit angleであるが慣用によりこう呼ぶ。

Fig. 3 Relation between depth of cut and burr height, and thickness

3. 実験結果および考察

3.1 切削条件とバリの形状

3.1.1 切込みの影響

図3はアキシアルレーキ(以下, AR と書く)7°, ラジアルレーキ(以下, RR と書く)−6°とし, DEA 30°, 送り0.1 mm/tooth一定として, CAを変えて被削材を切削した場合の切込みとバリの高さならびに厚さの関係を示している。

バリの高さは最初, 切込みに対してほぼ比例して増加しているが, CA 75°を除いて25°と45°においては切込みがほぼ1 mmで高さが急減している。これは切込みに比例して増加していたバリがその先端部で分離したためで, 1次バリから2次バリになったことを示している。

CA 75°においては, 本実験の範囲では2次バリを生成しなかったが, 25°と45°では, 25°の方が小さな切込みで2次バリとなっており, CAが小さい方が2次バリが生成しやすいことになる。2次バリになってからのバリの高さは, 切込みに関係なくほぼ一定で小さい。

バリの厚さと切込みの関係は, 最大厚さの場合, 2次バリになるとバリの測定する部分がなくなってしまう

Fig. 4 Effect of true rake angle on burr height

ので, 記入されていないが, 根元厚さと最小厚さは, ともにバリの高さの場合と同様, 急減している。しかし2次バリになってからも切込みの増加に対して若干増加の傾向がある点では, 高さの場合と異なる。

またCAのバリ寸法への影響は, 高さの場合, CAの小さな方が高く, 2次バリになってからも同じ傾向である。厚さの場合, 1次バリではCAが小さな方が厚く, 2次バリになると, CAの大きな45°の方が25°よりも厚くなっている。CA 75°の場合は1次バリであるのに2次バリと同じような厚さしかなく, 25°, 45°と比べて, その厚さは根元厚さ, 最大厚さ, 最小厚さどれをとっても小さい。このことは1次バリであった場合, ある程度以上の厚さのバリができるような切削状態になって初めて2次バリが生成することを示しており, 2次バリの生成によりその厚さが急減するのは, 1次バリとして成長していたバリが成長が完了する前に, その先端部が分離してしまい成長が止まってしまうからだと考えられる。

バリ取りを考慮して切削する場合, 切込みが小さい方がバリも小さいので, 小さな切込みで切削するのが最良であるが, 一般の切削においては, 1次バリの生成する切削条件よりも2次バリの生成する切削条件の方が, 切削量ならびにバリ取りという点では有利であろう。

3.1.2 すくい角の影響

図4はDEA 30°, 送り0.1 mm/toothとし, CAが25°で, すくい角がそれぞれ異なった工具を使って切削したときの切込みとバリの高さを示したものである。

ARとRRの影響をそれぞれ別々に述べるには工具の種類が十分でないので, 真のすくい角(以下, TR と書く)について考えると, TRの絶対値が小さいもの, すなわち, TRが0に近いものの方が小さな切込みで

Fig. 5 Relation between feed and burr height

2次バリを生成している。図には載せていないが、この傾向はCAが45°の場合も同じであり、CA 45°の方がCA 25°よりも同じAR, RRの場合、2次バリの生成する切込みは大きくなっている。

切削加工において、工具のすくい角はCAほど大きく変えることはできず、せいぜい本実験のような範囲程度であるばかりでなく、工具刃先の強度や切れ味という点から被削材によっても制限を受ける。そのような観点からすれば、本実験（被削材）において、すくい角が0に近い方が2次バリが生成しやすいという結果は、工具にとって有利なことと思われる。

3.1.3 送りの影響

図5はDEA 30°と切込み1mmを一定とし、CAを変えた場合の送りとバリの高さの関係を示している。CA 25°と45°をみると、送りが小さいところでは1次バリであるが、送りが増加するとまず25°が2次バリとなり、次に45°が2次バリとなっている。

一方、75°の場合は、0.15 mm/toothでも2次バリとなっていない。

送りと切込みでは、実験での送りは0.05, 0.10, 0.15 mm/toothというような値であるのに対し、切込みは0.5, 1.0, 1.5 mmというような値であり、送りは切込みの1/10のオーダーとなっている。このような条件のもとで送りと切込みのバリ生成への影響を比較するには無理があるかもしれないが、1次バリの場合は切込みと異なりバリの高さはほとんど送りに関係なく、ほぼ一定であるといえる。一方、2次バリの場合は切込みの場合と同様送りの場合もほぼ一定で、送りとバリ生成の関係は、切込みと同様送りが大きく、CAが小さい方が2次バリが生成しやすいということになる。

3.1.4 DEAの影響

図6はCA 25°, AR 7°, RR -6°の工具を使い、送りを0.1 mm/toothの一定とし、DEAをそれぞれ15, 30, 45, 80°として切削した場合の切込みとバリの高さ

Fig. 6 Effect of DEA and burr height

Fig. 7 Relation between DEA and effective radial depth of cut

の関係を示したものである。

どのDEAの場合も、切込みの小さい間は切込にはほぼ等しい高さのバリ、すなわち、1次バリが生成している。しかし切込みが増加するにつれ、まず、DEA 15°に急激なバリの高さの減少が起こる。これが2次バリの生成を示す特徴であり、このバリの高さの急減が切込みの増加に伴い、順次、30, 45, 80°の順で表れる。つまり、DEAが小さい方が小さな切込みで2次バリが生成することになる。

また、ここで特に注目すべきは、DEA 15°の場合、切込み0.5 mm以下でも、2次バリが生成していることである。このことより、一般の仕上加工で用いられる0.5 mm以下の切込みでも、DEA等の選択により2次バリの生成が可能であると考えられる。

ここで、DEAによる端面での実質的な送りの変化を考える。

正面フライス加工での工具の刃先はトロコイド曲線を描いていると考えられ²⁾、切削厚さ(半径方向の切込み、実質的な送り)は工具の位置によって変化する。

いま、CA, AR, RRをそれぞれ0°とすると、DEA(θ)と工具離脱側端面における切削厚さ f_r の関係は、一般に、次のように近似できる²⁾。

$$f_r = f \cdot \cos \theta \quad (f: 1 \text{ 刃当たりの送り})$$

この関係を示しているのが図7であり、DEAが正のとき工具離脱側端面はダウンカットで、負のときは

Fig. 8 Effect of feed on secondary burr formation

アップカットになっている。

同図をみると、DEAが0°のときが最大の値となっており、その値は1刃当たりの送りと等しい。すなわち、DEAの絶対値が小さくなるということは実質的な送りの増加につながり、送りが大きくなると2次バリを生成するという「3.1.3送りの影響」の結果と一致する。

DEAのバリ生成への影響という点に関しては、DEAによる切削力（3分力）の変化についても検討する必要があるが、それについては後の項で述べる。

3.2 2次バリ生成領域

生成されるバリは、後処理の点でいえば、大きな1次バリより小さな2次バリの方が処理しやすいので、各条件での2次バリの生成領域について検討する。

図8は送りによる2次バリ遷移点の切込みの変化を示している。切削条件としては、DEAが15°で一定であり、工具はAR7°とRR-6°が同じでCAが異なるものを使用している。2次バリ遷移点の切込みとは、1次バリが2次バリに変わるときの切込みのことであり、この切込みで切削すると、1次バリが生成する場合もあれば、2次バリが生成する場合もあり、バリ生成の再現性が非常に不安定な状態であり、2次バリを生成させようとするれば、これ以上の切込みで切削すればよい。

すなわち、図8においては、それぞれのCAの工具に対応する曲線の上側が2次バリの生成する切削条件を示す領域であり、CAが小さい方が、2次バリ遷移点の切込みを示す曲線が下の方にあり、2次バリの生成する切削条件の領域が広いことがわかる。

また、送りが大きくなるにつれて、2次バリ遷移点の切込みは若干小さくなっているが、通常の切削では、仕上面粗さや機械の剛性などの制限があって、切込みほど送りを大きく変えることはできないので、送りの変化により2次バリを生成させるというのは、むずか

Fig. 9 Effect of DEA on secondary burr formation

しいと思われる。

図9はDEAによる2次バリ遷移点の切込みの変化を示している。使用している工具は、図8の場合と同じであるが、図8の場合DEAが固定であるのに対し、図9では送りが0.1 mm/tooth（一部は0.15 mm/tooth）に固定されており、DEAが変化したときの2次バリ遷移点の切込みが示されている。

図9においては、DEAが増加するにつれて、どの工具の場合も2次バリ遷移点の切込みが大きくなっており、2次バリの生成する切削条件の領域が小さくなっていくことがわかる。特に、CA75°の場合には、DEAが30°で急激に2次バリ遷移点の切込みが大きくなっており、2次バリの生成する切削条件の領域が急減している。すなわち、CA75°の工具ではDEA30°を越えると2次バリを生成させるのがむずかしい。

また、CAが小さなものの方が2次バリの生成する切削条件の領域が広く、CA25°のものをみると、送りが0.15 mm/toothの方が2次バリの生成する切削条件の領域が広がっている。

そして、図8と図9より、2次バリの生成には、送りよりもDEAを変化させた方が効果が期待できることがわかる。

3.3 バリの生成機構

正面フライス加工におけるバリの生成機構を明らかにするため、工具離脱側端面における切削力の測定を行った。

図10はDEAを変化させた場合の工具離脱側端面での3分力を示したものである。切削条件としては、切込み1 mm、送り0.1 mm/toothで、使用した工具はAR8°、RR0°のCAがそれぞれ25°、45°、75°のものである。

切削力の測定においては、Xを送り方向、Yを工具離脱側端面に直角な方向、Zを主軸方向としている。また、それぞれの正の方向は、Xでは工具の送られて

Fig. 10 Relation between DEA and components of cutting force

いく方向、Yでは工具の離脱する方向、Zでは被削材を押さえる方向である。

X, Y, Z方向ともDEAが減少するにつれ、切削力のそれぞれの分力は増加している。これは、図7で示したように、DEAが小さくなると切削厚さが増加するので、切削力が増加し、各分力も増加すると考えられる。

バリの生成という観点から切削力をみると、バリは被削材の端面に直角に生成するのであるから、Y方向の力がバリ生成に関係があることになる³⁾。そして、このY方向の力がある程度以上大きくなった結果、生成した1次バリの一部が引きちぎられて2次バリとなるのなら、Y方向の切削力が大きなCA 75°の工具の場合の方が2次バリが生成しやすいことになるはずである。しかし、実際は、Y方向の切削力の小さいCA 25°の方に2次バリが生成している。

そこで、工具の送り方向であるX方向の力をみると、CA 25°と45°の工具においては、DEAの大きな間は、その値は負（反送り方向）であり、1次バリを生成しているが、DEAが30°になると正（送り方向）となり、2次バリが生成している。また、CAが75°の工具もDEAが大きな間は、その値が負で1次バリを生成しており、DEAが15°となると、その値は正となり2次バリを生成している。すなわち、2次バリの生成は送り方向の力と大いに関係があることになる。

さらに、このような観点より、1次バリと2次バリの生成状態の観察を行った。

図11は工具離脱側端面に生成した1次バリと2次バリの代表的な状態を図示したものである。

正面フライス加工においては、未切削面が横切れ刃ならびにノーズ部で除去されることにより切削面が生

Fig. 11 Illustration of primary and secondary burr formation

成される。バリの生成は、被削材の端面における未切削面から切削面に至る横切れ刃ならびにノーズの一部で生成される面（以下、遷移面と書く）で行われ、切削面においてバリは完成する。

1次バリと2次バリの生成状態を比べてみると、未切削面において、どちらの場合も既に工具離脱方向に塑性変形が始まっているが、2次バリの方が送り方向の塑性変形が大きい。これは、2次バリの場合に、切削力の送り方向成分が正であるということと一致しており、この未切削面の工具離脱側端面における送り方向の塑性変形量は切削力の送り方向成分の大きさを表す一つの指針になると考えられる。

未切削面の塑性変形のため工具離脱側端面より流出した部分は、遷移面において成長するが、2次バリの場合、遷移面に生成しているバリが送り方向にカールするため、遷移面端面のバリが切削面に移行する部分において引張られ、切削面には、引きちぎられた残りの部分だけが2次バリとして生成する。一方、1次バリの場合には、このようなカールの発生はなく、遷移面端面で成長したバリが、分離されることなくそのまま切削面に移行する。

2次バリの生成は、以上のように、遷移面端面におけるバリのカールと関係があり、このカールの発生は、未切削面における送り方向の塑性変形、すなわち、切削力の送り方向成分の大きさと関係があることになる。

4. 結 言

- (1) 工具形状や切削条件を変えることにより、高さが切込みに比例した1次バリや1次バリに比べて高さの小さい2次バリを生成させることができ

- る。
- (2) バリ取りだけを考えた場合、小さなバリを生成させるほどバリ取りは容易であるので、できるだけ小さな切込みで切削する方がよいが、切削による除去能率も考えるならば、1次バリの生成する切削条件よりも、送りや切込みを大きくして2次バリの生成する切削条件で加工する方が有利である。
- (3) 切削条件としては、切込みと送りが大きく、DEAが小さいほど2次バリは生成しやすい。
- (4) 工具形状としては、横切れ刃角とすくい角が小さいほど2次バリは生成しやすい。
- (5) 2次バリの生成と切削力の送り分力とは密接な関係があり、送り分力により遷移面端面のバリがカールされ、1次バリの一部が分離して2次バリが生成すると考えられる。

以上、2次バリの生成条件ならびに生成機構について検討を加えたが、被削材の延性等を考えた場合、単に、切削力の送り方向成分が正になっただけで2次バリが生成するとは限らず、遷移面端面のバリの大きさ、切削力の大きさと方向ならびに被削材の延性等が重要な役割を占めると考えられ、今後、被削材の延性や硬さならびに切削油剤や工具摩耗等の2次バリ生成への影響を明らかにする予定である。

参 考 文 献

- 1) 佐藤正信, 東村嘉弘, 高野乾輔: 旋削加工におけるバリ生成に関する研究, 精密機械, 45, 8 (1979) 932.
- 2) 益子正巳ほか: フライス削りとフライスの設計, ラジオ技術社 (1964) 3.
- 3) F. Schäfer: Entgraten in der Fertigungstechnik, wt.-z. ind. Fertig., 63, 11, (1971) 691.

(p. 70 より続く)

また、各論では需要部門別の生産量、生産額を昭和25年から60年までの数値とその生産構成比によって一覧化した。さらに各業種を従業員規模別、業種別(専業、兼業、一貫メーカ)、都道府県別に分け、それぞれのグループについて工場数、従業員数、生産量、現金給与などの詳細データを示すことによって、規模間格差、中小専業メーカと大手内製メーカの格差や地域差の把握に役立つような統計資料としている。

素形材産業の一般概況をみると、全般的には好調を持続したものの、年央以降は円高・ドル安の影響を受け、10月をピークとして徐々に下降傾向を示しており、全体としては前年に比べわずかながら増加した。具体的には、鋳造品は698万9853tで前年比2.3%増、鍛造品は232万4340tで同1.1%の増である。

これを総生産額でみると、鋳造品は2兆1552億円で前年比3.2%増、鍛造品6185億円で同1.3%増、金属プレス加工は1兆501億円で同5.4%増、粉末冶金製品は2171億円で同3.3%減、全体としては4兆410億円、3.1%増となっている。

60年の業種別素材製品では鋳鉄管、可鍛鋳鉄が生産量

の減少にもかかわらず、生産額が上昇したものの、反対に粉末冶金製品は生産量の増加にもかかわらず、生産額は減少している。また51年を基準とした60年の生産額の伸び率は精密鋳造品が4.31倍と突出して高く、低いのは銅合金鋳物の1.17倍などで、全体に2倍を超えている業種は少ない。

60年12月末現在の業種別従業員規模構成比をみると、49人以下の規模は鋳鉄鋳物77.6%、銅合金鋳物91.2%、軽合金鋳物82.5%、ダイカスト80.0%となっており、素形材産業の中でもこれらの業種の小企業性を知ることができる。また業種別従業員数は鋳鉄管、可鍛鋳鉄、鋳鋼品が前年比5.2%から6.9%減と比較的大きくなっている反面、ダイカスト、精密鋳造品は常に増加傾向にある。

どの業種でも新記録をつくったのが従業員一人当たりの年間生産量で、業種別では鋳鉄鋳物98.2t、前年比3.7%増、鋳鉄管173.2t、同4.5%増、可鍛鋳鉄76.6t、同4.8%増、ダイカスト40t、同8.7%増、鍛工品135t、同3.5%増、粉末冶金製品14t、同6.0%増となっており、生産性を向上させている。

(p. 109 へ続く)