ドリル加工におけるバリ生成に関する研究*

——バリ生成時の材料の変形状態——

三宅輝明** 山本章裕** 北嶋弘一*** 田中行雄† 高沢孝哉††

Study on Mechanism of Burr Formation in Drilling
-Deformation of Material during Burr Formation-

Teruaki Miyake, Akihiro Yamamoto, Koichi Kitajima,
Yukio Tanaka and Koya Takazawa

This paper deals with exit burrs produced in drilling. The development of yielded, deformed and strain-hardened area is investigated respectively by Finite Element Method(FEM), Grid Method(GM) and Hardness Distribution Measurement(HDM) to clarify the burr formation mechanism. In FEM, the drill exit part of workpiece is divided into 198 triangle elements and 119 nodes. For GM and HDM, aluminum alloy(A6030 in JIS) plates of 10mm thickness are drilled under various cutting conditions with drills of 8mm diameter and various helix angles. And also the measurement of cutting forces is done at the same time. The plastic deformation of workpiece starts at the drill point part, and then occurs mainly at the outer corner part. Both plastic deformation and burr become small as the helix angle increases. Burr shapes are divided mainly into two types. One is a small even burr with or without a conical hat chip. The other is a large burr shaped like a petal. The difference of the two burrs is caused by the formation of a conical hat chip.

Key words:drilling,aluminum alloy,burr,finite element method,hardness distribution

1. 緒 言

ドリルによる穴あけは切削加工の中で占める割合が比較的高い。また、穴あけ加工の能率から考えても、ドリル加工が最も能率的である。

しかし、通り穴においては、穴の入口と出口にバリが発生し、特に通り穴出口に生じるバリは入口のものに比べて大きく、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ばかりでなく、種々のトラブルの原因となるので、穴あけ後にバリ取りを行うことが多く、ドリル加工の高能率性が著しく阻害されている。そのため、バリの抑制が重要な課題となっている。

一方、ドリル加工に関する研究は数多くみられるが、バリについての研究¹⁾²⁾は少なく、その根本的な生成機構についての研究にはまだ不明の点が残されている。

また、抑制対策は、この生成機構が解明されることにより明確になるものであるが、ドリルの形状、寸法、加工材料及び加工条件のバリ生成に及ぼす影響が極めて複雑であるため、まだ十分ではない。

そこで、筆者らはバリの生成するまでの被削材の変形状態を解析し、バリの生成機構について検討するとともに、種々のドリルを用い、加工条件とバリ生成状況との関係を求めた。

2. 有限要素法によるバリの変形解析

2.1 バリの変形解析方法

ドリル加工において生成されるバリは、切残し部がドリルにより塑性変形を受けて生成されるので、ドリルの突き抜け直前の被削材の変形状態を解析することは、バリの生成機構を解析する上で重要である。

そこで、有限要素法を用いて塑性域の広がり状態を2次元平面問題として検討した。

図1は、有限要素法で解析する際に用いたドリルの突き抜け直前の被削材の状態を表すモデルで、要素数198、節点数119の三角形要素に分割し、ドリルの先端部はX方向だけを、被削材の外周部はX、Yの両方向

* 原稿受付 平成2年7月23日.1989年度精密工学会秋季大会学術講演会(平成元年11月7日)にて発表

** 正会員 兵庫県立工業技術センター(神戸市須磨区行平町3-1-12)

*** 正会員 関西大学(吹田市山手町3-3-35)

† 名誉会員 関西大学

†† 名誉会員 神奈川工科大学(厚木市下荻野1030)

Fig.1 Model for FEM

を拘束するように拘束点を与えた。

また、接点力は、当モデルのようなドリルの突き抜け直前では、主切れ刃の位置によって被削材の剛性に差があるので、被削材の下側までの距離に比例して与えた。

計算手順は次のとおりである。

- ① 適当な試験荷重を加え弾性計算を行い、節点変位、要素の応力とひずみを求める。その結果より、各要素の相当応力 σ_e を求める。
- ② 試験的な荷重増分 ΔP に対して、各要素の降伏応力を計算で求める。
- ③ 降伏した全要素について、節点変位、要素の応力とひずみの増分を求める。
- ④ 前段階まで弾性域であったすべての要素の降伏応力を求める。

また被削材の材料定数としてはアルミニウム合金を想定し、

縦弾性係数 $E = 70000 \text{ MPa}$
 ポアソン比 $\nu = 0.33$
 降伏応力 $Y = 92.7 \text{ MPa}$

を使用した。

2.2 バリの変形解析結果

図2にドリルによる穴あけの際に生じる塑性域の進展過程を示す。この図によると、まず最初にドリルの先端の被削材が降伏し、つぎに、ドリルの肩が位置する場所と表面と裏面の拘束点が降伏する。そして、ドリルの肩付近を中心に塑性域が拡大していく。これに対して、最初先端部に生じた塑性域はほとんど拡大していない。

つまり、先端部はX方向のみ拘束で、Y方向は自由であるため、最初荷重を受けた時圧縮変形が生じて降伏を起こす。その後、塑性変形が進むためには、周囲の弾性域を降伏させなければならないが、この部分の拘束はX方向のみであり、また周囲の要素からの拘束も少ないので、周囲に塑性域を広げることなく変位が

Fig.2 Development of plastic area

Y方向に進行する。

一方、ドリルの肩部の部分は、周囲の要素からの拘束が大きく、接点力（主切れ刃による切削力）も大きいので、肩の部分に塑性域が現れると、順次、拘束力の大きな被削材外周部の拘束点と肩の部分を中心として塑性域が拡大していく。そして、さらに塑性域が拡大すると、被削材が先端で破断し、拘束がとれて自由となり、バリが生成され则认为られる。

3. 実験方法

3.1 バリの測定

穴あけ加工で生成されるバリは図3に示すように穴の入口と出口に生じる。特に出口に生じるバリは大きさも大きく除去しにくいので、出口バリに焦点をあてて論じることとする。

生産過程においてはバリの高さが問題になるが、バリ部の塑性変形状態を考えると、ドリルの半径方向への変形も見逃せない。

従って、本来バリを評価するには、その体積で表現すべきであり、近似的に見れば、バリの体積はバリの面積により決定される。

そこで、本論文では、バリの高さを測定するととも

Fig.3 Burrs produced in drilling

に、バリの根元厚さとして裏面の表面とバリの曲面とが交わる位置までの距離を測定し、バリの断面が三角形であると仮定して、三角形の面積を求めバリの量とした。

なお、バリの高さと根元厚さとして、同一条件で加工した3つのバリの平均値を取った。

3.2 格子法による変形解析

有限要素法では、ドリルの先端が突き抜ける瞬間での被削材の塑性域の進展過程を取り扱うが、格子法では、さらにドリルが進んだ状態での被削材の変形状態を実験的に検討する。

被削材の一断面に0.2mm間隔の格子をフォトエッチング法により焼き付け、断面を合わせて固定し、合わせた位置に穴あけを行って、ドリルが突き抜ける直前で送りを停止させ、とりはずして格子の変形状態から主応力の方向を求めるとともに、図4に示す角度(γ)を測定することによりせん断ひずみ($\tan \gamma$)を求めた。

Fig.4 Measured positions for shearing strain

3.3 ひずみ硬化層による変形解析

格子法でひずみ分布を求める場合、ドリル加工でのドリルの突き抜け直前では、縦等断面に対して引張応力が作用すると考えられるので、确实性の点で疑問が残る。そこで、ひずみが大きくなると硬さも増すというひずみ硬化に着目し、比較的測定が容易な硬さの分布を測定することによって、材料変形状態を調べた。硬さ分布はピッカース硬さを測定することにより求めた。また、試験荷重による硬さの変化を求めると、100gf以上の荷重ではほぼ一定の硬さを示したので、試験荷重を100gfとした。

3.4 実験装置及び条件

実験は剛性の高い(株)牧野フライス製作所製4番のNC縦フライス盤を用い、乾式切削で行った。

Table 1 Aluminum alloy (A6063) used in experiment

Mechanical properties		Chemical compositions			
Tensile strength MPa	Elongation %	Si	Mg	Fe	Al
166	16	0.41	0.55	0.18	98.86

Table 2 Experimental conditions

Drill dimensions		Cutting conditions	
Diameter	8mm	Feed rate	0.03-0.30mm/rev
Material	SKH51	Rotational speed	1060, 1780rpm
Point angle	118°	Cutting speed	26.6, 44.7m/min
Helix angle	15-40°	Cutting fluid	Dry

被削材はアルミニウム合金A6063で、その機械的性質と成分は表1に示すとおりである。

また、表2に実験条件及びドリルの形状を示す。

4. 実験結果と考察

4.1 格子法によるひずみの解析

図5は板厚10mmの被削材に、ドリルを切削開始から11.0mm送ったところで停止させたときの格子の変形と主応力の方向を示したものである。

格子の変形状態を見ると、縦線はドリルの中心方向に倒れていき、横線はドリルの送り方向に曲がっている。縦線の倒れは、どちらの場合もドリルの肩付近の外側で大きくなっており、ドリルの肩から主切れ刃の部分になると傾きはほぼ一定の平行線となっている。

Fig.5 Deformed grid and principal stress direction

また、横線も同様の傾向であるが、送りが0.3mm/revの場合は、0.05mm/revに比べて単調な曲がり方であり、主切れ刃の部分から被削材裏面に向かって、横線の間隔が狭くなっている。

一方、0.05mm/revの方は被削材裏面付近では横線の間隔が狭くなっているが、途中では広がっている部分

もあり、応力分布の状態が0.3mm/revにくらべて複雑なことがわかる。

この原因としては、0.3mm/revの方は既に未切削部が送り方向に押し曲げられているのに対し、0.05mm/revの方の未切削部はまだ押し曲げられておらず、正常な切削が行われているからであると考えられる。

すなわち、0.3mm/revの場合は、未切削部がドリルのスラストにより送り方向に逃げ始めており、切削が行われなくなる状態に近づいているため、未切削部に作用する力はスラストが主であると考えられる。一方、0.05mm/revの場合は、正常な切削が行われており、未切削部に作用する力はスラストだけでなく未切削部に食い込んだ主切れ刃によるねじりや引張りも作用していると考えられ、格子の変形も単調でない。

また、主応力について見ると、0.05mm/revの方は、主応力の方向を示す十字の印(+)が余り傾いていないが、0.3mm/revになると十字の印は主切れ刃に対して平行ならびに直角な方向を示している。このことは、やはり0.3mm/revの方がスラストの影響が大きいため、丁度スラストの主切れ刃方向とそれに直角な方向の成分の力が未切削部に作用したことを示していると考えられる。

つぎに、ドリルのねじれ角を変えた場合のひずみについて検討する。図6に切削速度 $V=26.6\text{mm/min}$ 、送り $f=0.1\text{mm/rev}$ の場合にねじれ角をパラメータとし、裏面より0.4mmのところの(2本目の)格子の横線について、ドリルの肩の位置を基準として求めたせん断変形を示す。この場合、切削開始から11.3mm送ったところでドリルをもどした。

Fig.6 Effect of helix angle on shearing strain

基準線(ドリルの肩の位置)でのせん断変形を比較すれば、ドリルのねじれ角が小さい程せん断変形は大きくなる。特に、ねじれ角 $\beta=15^\circ$ の場合は非常に大きな値を示し、変形が被削材の深部にまで及んでいる。

これは、ドリルのねじれ角はバイトの工具のすくい角にほぼ等しく、旋削においてはすくい角の増大に伴い切削性が向上することは、一般的によく知られている現象である。穴あけ加工においても旋削と同様にねじれ角の増大に伴い切削性が向上していることがわかって³⁾。

従って、ねじれ角が小さい場合、切削性が悪く、切削抵抗も大となり、被削材の未切削部の剛性に打ち勝って変形が大きい。

また、ねじれ角が大の場合は、これとは逆に未切削部が少なくなるまで切削が行われ、変形が小さくなる。

つぎに、送りをパラメータとした場合のねじれ角とバリの関係について図7に示す。図より、主軸送りが大きい場合は、ねじれ角の影響が現れて、ねじれ角が増大するとバリの量は減少している。また、主軸送りの小さい場合には、ねじれ角の大小にかかわらず、全体的にバリの量は少ない。すなわち、ねじれ角が小さい場合は切削性が悪く、被削材の変形も大きくなるため、バリの量が多くなっている。

Fig.7 Relationship between helix angle and burr amount

4.2 バリ生成領域におけるひずみ硬化域の形成について

ドリル加工において、バリがどのような過程を経て生成されるかを図8のような変形状態と考えた。すなわち、ドリルの肩部が(a)被削材の裏面より若干手前、(b)裏面に達した直後、および(c)裏面を突き抜けた時の3段階に送りを停止させバリの生成過程を調べた。

Fig. 8 Burr formation process

ただし、図中のA部は変形して将来バリとなるであろう領域、またB部は切残し部となる領域を示している。

図9はアルミニウム合金のドリル加工におけるバリの代表的なものである。

(a) Small burr with a conical hat (b) Large burr like a petal

Fig. 9 Typical burrs produced in drilling

左側のバリは図8に示すA部から破断されて笠状の切残し（陣笠）となったB部の一部がまだA部に付いている例であるが、この場合、一般にB部は陣笠となって取れてしまい、後には高さがほぼ一定の小さなバリがA部として残る。

一方切削が進行しても、なおA部とB部が破断せず、一体となったままチゼル部から押し広げられたものが右側の花弁状のバリである。

図10は各送り停止位置におけるバリ領域断面の微小硬さ分布を示したもので、(a)、(b)はそれぞれドリルの肩部が被削材の裏面から3mmおよび1mmの位置における状態を示す。(c)はドリルの肩がちょうど裏面に達した状態である。図中の口印の領域（HV=44.4～48.3）に注目すると、ほぼ定常状態とみなし得る(a)では、送りに垂直な半径方向には穴壁面から約400 μ mの硬化域を生じている。

送りが進行し、バリ厚さが形成され始める(b)の状態になると、その硬化域が約1mmにも達し、バリ厚さの根元に相当する点に向かってくさび状の硬化域が形成されている。

さらに、(c)の段階に至ると領域的な変化は認められないが、ドリルの肩部に向かう硬さ勾配は、(b)に比べかなり急激になっている。また、図中の■、●印の領域（HV=56.4以上）については、(a)では主切れ刃に沿う領域のうち、切れ刃の中間点から外周に向かう部分とチゼル部に存在するか、送りが進むにつれてチゼル

Fig. 10 Hardness distribution in burr forming area

部の硬化域は切削されるため消滅し、ドリルの肩部に近い部分のみに限られる。このように、加工硬化された領域が減少することは、材料的強度が低下したことを意味し、切削力の集中がチゼル部から剛性の高い肩部の方へ移行することを示すものである。チゼル部の硬化状態は(b)から(c)に至っても顕著な変化は見られず、これは、多少の切削が行われているものの、自由空間への押しだし作用が支配的であることを示している。

4.3 切削抵抗とバリについて

ドリルによる穴あけ加工においてスラスト及びトルクを切削動力計により測定し、電磁オシログラフにより記録した。バリが生成される領域をドリルの先端が被削材の裏面に達してからドリルの肩が裏面から抜け得るまでと考え、トルク及びスラストと送り速度との関係を単位時間（本研究では1/10s）ずつ区切り、ドリルがある位置から次の位置に移動するのに要する仕事を計算し、バリ生成領域における仕事を求めた。

図11に、バリ生成領域における仕事とバリの量との

Fig.11 Relationship between work by cutting force and burr amount

関係を示す。

バリ生成領域における仕事とは、バリを生成させるための仕事、すなわち未切削部をドリル外周に向けて押し曲げる仕事と未切削部を切削する仕事との和のことである。そして、バリ生成領域において、未切削部を切削する仕事が多ければバリの量は少なく、バリを生成する仕事が多ければバリの量は多いということになる。

スラストによる仕事とトルクによる仕事のうち、どれだけが、バリ生成の仕事で、どれだけが、未切削部を切削する仕事であるかは不明であるが、傾向としては、スラストによる仕事が $0.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 以上、トルクによる仕事が $6\text{ N}\cdot\text{m}$ 以下のところでバリの量が大きい。

また、仕事の大きさという観点からすると、トルクによる仕事の方がスラストによる仕事の10倍ほどの大きさであり、スラストによるものを無視すると、仕事が多い方がバリの量が少いということになる。このことは、バリ生成領域においては未切削部をバリと

して押し曲げてしまった方が仕事が少ないと示すことを示しており、逆に未切削部を切削しようとするスラストが小さくなるような条件で、未切削部がドリル外周部に向かって曲がり、逃げないように加工しなければならない。そのためには、送りを遅くし、時間をかけて切削する必要がある、トルク、スラスト自身は小さな値であっても全体として大きな値となるということである。また、トルクによる仕事は切削もしくはドリルが未切削部を擦ることに伴う発熱であると考えられる。

5. 結 言

穴あけ加工におけるバリの生成するまでの変形状態を、有限要素法、格子法、硬さ分布法を用いて検討し、次の事項が明らかになった。

- (1) 有限要素法では、穴の貫通直前の被削材の塑性変形は、最初、ドリルの先端が位置する部分に発生する。つぎに、ドリルの肩が位置する部分に発生し、そして、被削材外周部の拘束点と肩の部分を中心として塑性域は拡大する。
- (2) 格子法では、ドリルの肩が位置する部分に大きな変形が起こっており、送りが大きくなると未切削部にはスラストだけが作用するようになる。
- (3) 硬さ分布法では、ドリルの肩部と未切削部に加工硬化が起こっており、有限要素法、格子法と同じような傾向を示した。
- (4) ドリルのねじれ角を増大させると、せん断変形は減少し、バリの量も小さくなる。
- (5) バリの形態は大きく2種類に分けることができる。一つは、笠状の切残し部が笠状のまま分離した高さがほぼ一定の小さなバリであり、もう一つは、笠状の切残し部の中心がドリルの先端で破られ、押し広げられた花弁状の大きなバリである。つまり、これらのバリは、バリの先端部と笠状の切残し部（陣笠）との破断の有無によって生成する。

参 考 文 献

- 1) 結城明泰：穴あけにおけるかえりの研究，大阪大学教育学部研究紀要，3,3(1968)47.
- 2) H.Shikata & M.E.Merchant: An Experimental Investigation of Sheet Metal Drilling, Ann. CIRP, 29/1, (1980)85.
- 3) 西田修三ほか：ドリル加工に関する研究（第1報）— 加工条件と加工抵抗，機械試験所所報，16,1(1962)1.