

ドリル出口バリの生成過程とその抑制

Minimizing Burr Formation in Drilling Through Holes

安木 誠一* 藤原 久一**

Seiichi Yasuki Hisakazu Fujiwara

(2014年8月1日 受理)

キーワード：ドリル，バリ，切削動力計，スラスト力，マシニングセンタ

1. はじめに

穴加工をおこなう加工法は数々あるが、そのなかでもドリルを用いた切削加工による穴加工法は、加工精度と加工能率のバランスが優れており、加工コストの面からも実用的に広く用いられている。その基本となる切削加工は、素材よりも十分に硬く、強度のある工具を用いて、不要な部分を積極的に塑性変形させて切り屑として分断し、除去する加工である。その原理上、切り屑となる除去部分だけでなく、工具刃先の加工点近傍にも塑性変形が生じ、加工物と切り屑の境目である加工面の側にも塑性変形が残ってしまう。この塑性変形領域が、加工端部などで、自由空間に押し出されることによってバリとなる。

ドリルによる穴加工においては、特に、貫通穴加工時において、自由空間側である出口側に発生する出口バリの高さが、条件によっては、ドリル直径よりも大きくなることもあり、形状・寸法、機能、品質を悪化させる長年の課題となっている。これは、ドリル加工が2つの刃先が螺旋状に回転して進行する複雑な加工であり、出口バリの形成が、工具刃先の加工点近傍に生じる塑性変形だけではなく、貫通直前の被削材の変形に大きく依存するためである。

この出口バリの効果的な抑制手段として、これまでに、振動切削¹⁾やローソク型ドリルなどの特殊形状ドリルの使用などが提案されているが、振動装置の導入や特殊形状ドリルの再研磨に掛かるコストなどの問題

により、これらの抑制手段は本格的な普及に至っていないのが現状である。これは、後工程での除去にかかるコストの方が、様々なバリ抑制手段にかかるコストよりも低いためである。

本報告では、比較的導入が簡単で低コストとなる抑制手法確立に向けて、延性が高く、悪化した出口バリが生成しやすい軟鋼やアルミに対して、標準的なドリルによって穴加工を行い、まず、バリ生成過程に及ぼす切削条件などの影響について調査した。その後、特殊な装置や工具などを必要しない出口バリの抑制方法についての検討を行った。

2. ドリル出口バリの形態と生成過程

2.1 実験方法

加工実験は、図1に示すように、マシニングセンタを用いて、標準的な形状の直径 $\phi 2.0$ mmのドリルによる貫通穴加工を、工具材と被削材の組合せや切削条件を変えて行った。被削材を固定する治具には、貫通穴加工時に、ドリルの治具との干渉と、出口バリの生成を妨げないように、ドリル加工位置に合わせて複数の直径 $\phi 4.0$ mmの穴を設けている。加工中のスラスト力(工具進行方向を正)を切削動力計で測定し、出口バリの形態を光学顕微鏡で観察した。実験に使用した加工機、計測器、及び切削条件の詳細は表1に示す通りである。また、貫通直前からバリ生成までの被削材の変形状態の変遷を観察するため、一部の代表的な切削条件について、加工深さをドリルの先端が被削材の底面に到達した時点から、貫通してバ리를生成する

* 加工成形科

** 大阪府商工労働部中小企業支援室ものづくり支援課

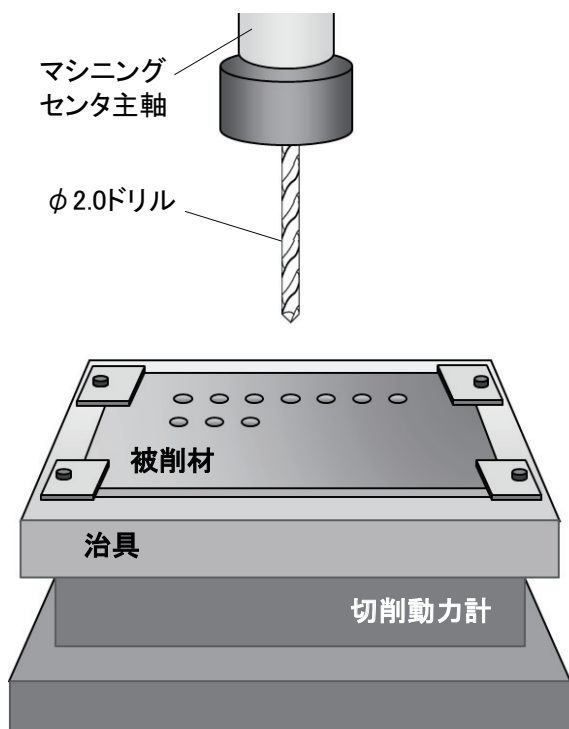


図1 実験装置の概略

表1 実験条件, 使用機器

工具	超硬ドリル (直径 φ 2.0mm, 先端角 118°, ねじれ角 30°)
被削材と 切削条件	純アルミ板 (A1050: 板厚 3.0, 6.0mm) 切削速度 25.1~113.1m/min 送り量 0.01~0.10mm/rev 冷間圧延鋼板 (SPCC: 板厚 3.2mm) 切削速度 12.6~50.3m/min 送り量 0.01~0.05mm/rev
加工機	牧野フライス製作所製 マシニングセンタ MS40
クーラント	エマルジョンタイプ 濃度約10% 外部給油
切削動力計	キスラー製 三成分動力計 9255B
光学顕微鏡	キーエンス製 マイクロスコープ VH-5900

までの範囲で 0.1 mm ずつ変化させた加工を行った。

2.2 切削加工条件とバリ形態の変化

図2は、冷間圧延鋼板 (SPCC: 板厚 3.2 mm) 対して、横方向に1回転あたりの送り量 (以後、単に「送り量」と呼ぶ) を 0.01~0.05 mm/rev の範囲で 0.005 mm/rev 刻みで9条件、縦方向に切削速度を 12.6~50.3 m/min の範囲で 6.3 m/min 刻みで7条件を設定し、それらの組み合わせ、合計 63 種類の切削条件で加工した際の被削材のドリル出口側の写真である。切削速度と送り量

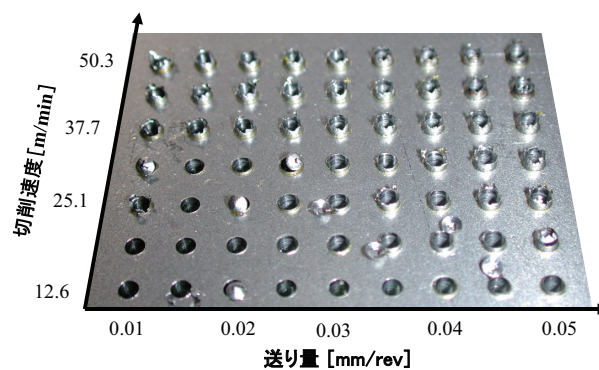


図2 切削加工条件とバリ形態の変化 (超硬ドリルで冷間圧延鋼板)

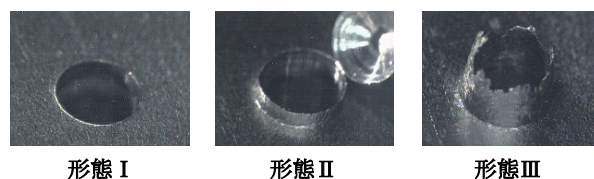


図3 生成されたバリ形態

が共に小さい条件ではバリがほぼ認められないが、送り量、あるいは切削速度の上昇とともにバリが生成される様子が明確にわかる。さらに加工条件の違いにより生成された出口バリの形態は、図3に示すように、出口バリの大きさの違いから、概ね次の3つの形態に分類される。

(形態I) バリがほとんどない (高さ 0.1 mm 以下)

(形態II) 淵がなめらかなバリ形態

(形態III) 淵が破裂したバリ形態

2.3 バリ形態ごとの生成過程の比較

図4はこれらの形態の生成過程の違いを比較するため、バリ形態I、II、IIIのそれぞれを生成する代表的な切削条件ごとに、ドリル加工深さを変えた加工を行い、被削材底面の変形の進行状況を比較したものである。ドリルの被削材に対する位置は、その先端がちょうど底面に達した位置を基準 (0.0 mm) として、加工進行方向を正として表記している。

出口バリがほとんど生じないバリ形態Iにおいては、ドリル先端の進行に伴う被削材底面の変形が小さく、ドリル肩位置が被削材底面に到達したとほぼ同時に、被削材の円錐状に変形した部分が切り取られ、被削材にはバリがほとんど残っていない。バリ形態IIは、バリ形態Iに比べて被削材底面の変形量が大きいため、ドリル肩位置が被削材底面に到達した直後 (0.7 mm) には、まだ変形部分が切り取られていない。その後しばらく被削材の変形が続いてからドリル先端位置が 1.2 mm に達した際に、被削材の変形部が切り取

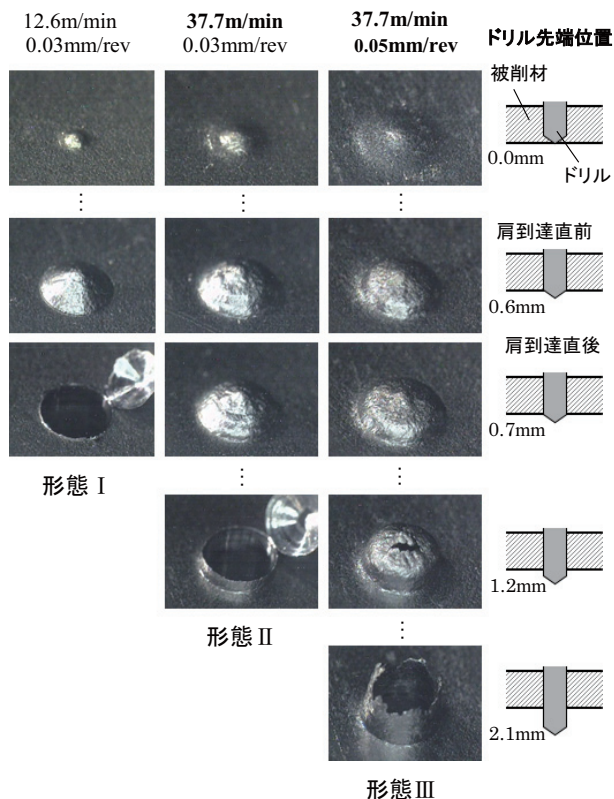


図4 バリ形態ごとの生成過程の比較

られている。この時点までに底面の変形がドリルの直径φ2.0mmの範囲よりも大きくなっているため、直径ドリルφ2.0mmのドリルでは底面変形部分を除去することができず、ある程度の高さのバリとして残ってしまっている。バリ形態Ⅲでは、他のバリ形態と比較して、ドリルの進行に伴う被削材底面の変形が最も大きく、ドリルの肩部分によって切り取られる前に、変形領域の中心部が裂けてしまっている。そのまま伸ばげて伸ばされた結果、淵が破裂した形のバリが大きく形成されてしまっている。

これらの形態Ⅰ～Ⅲのバリを同じドリル先端位置で比較すると、ドリル先端が底面に達した0.0mmの位置の時点で、すでに底面変形量に差が生じており、ドリルの進行に応じてその差が広がっている。このように、バリ形態の違いは、被削材底面の変形進行状況の違いにより生じており、この変形をいかに抑制するかが、バリの抑制に重要であることがわかる。

3. 加工力のバリ形態への影響

3.1 スラスト力とバリ形態

同じドリル先端位置であっても、底面の変形量が異なる原因の1つは、被削材に加えられるスラスト力であると考えた。図5は、スラスト力と送り量との関係

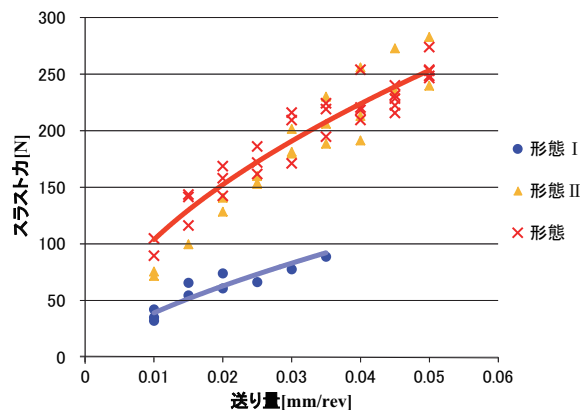


図5 送り量とスラスト力の関係 (超硬ドリル-冷間圧延鋼板)

をバリ形態ごとに区別して示したものである。バリ形態Ⅰとバリ形態Ⅱ・Ⅲで、スラスト力に異なる2つの関係が現れている。スラスト力は、ドリル形状、比切削抵抗、送り量に依存した経験式となることが知られており²⁾、それに従えば、この実験では、切削条件のみを変化させているため、スラスト力は送り量により一意に決まることになる。図5に示すような、送り量とスラスト力の関係が2つ現れている原因は、例えば、溶着による見かけのドリル形状の変化や加工熱による被削材物性(比切削抵抗など)の変化といった加工状態の急激な変化などが生じているためと推測される。そして、この急激な変化がバリ形態Ⅰとバリ形態Ⅱ・Ⅲにおける生成過程の違い、つまり被削材底面の変形の違いを生じる要因になっていると考えられる。このような急激なスラスト力の変化を抑制することがバリの低減に効果的であるといえる。

3.2 工具材料と被削材の組み合わせの影響

次に、被削材を、純アルミ板A1050(板厚3.0mm)に変えて、貫通穴加工時の切削加工条件を変化させた実験を行った。図6は、図2と同様、横方向に送り量、縦方向に切削速度をそれぞれ変化させて、それらの組み合わせの切削条件で加工した際の被削材のドリル出口側の写真である。被削材の物性が冷間圧延鋼板とは異なるため、送り量は0.01~0.10mm/revの範囲で0.01mm/rev刻みで10条件、切削速度は25.1~113.1m/minの範囲で12.6m/min刻みで8条件を設定し、それらの組み合わせで合計80種類での切削条件で貫通穴加工をおこなっている。

冷間圧延鋼板への加工の際と同様に、切削条件の変化によって、形態Ⅰ～Ⅲのバリ形態が現れているが、切削速度の影響をほとんど受けていない。送り量を0.02mm/rev以下に抑えれば、切削速度を上げた場合

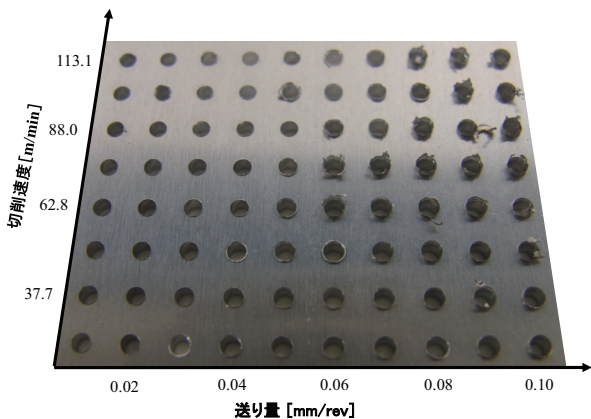


図 6 切削加工条件とバリ形態の変化 (超硬ドリルー純アルミ板)

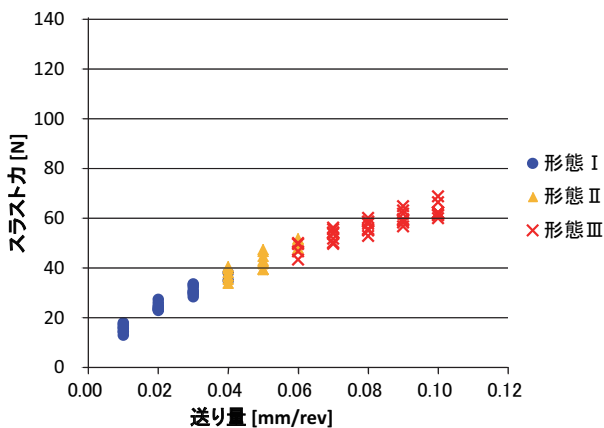


図 7 送り量とスラスト力の関係 (超硬ドリルー純アルミ板)

でも、バリは悪化していない様子が見える。

また、図 7 は、バリ形態ごとにスラスト力と送り量の関係を整理したものである。冷間圧延鋼板と超硬ドリルとの組み合わせで見られた急激な加工状態の変化は現れておらず、送り量とスラスト力の関係は、1つの関係で示される。これは、純アルミ A1050 の方が冷間圧延鋼板よりも、超硬との親和性が低いためであり、切削条件を変化させても安定した加工が行えていると考えられる。送り量とスラスト力の関係が 1 つとなる被削材と工具材料の組み合わせであれば、送り量をさえ抑えれば、スラスト力が低減でき、出口バリの抑制につながる。冷間圧延鋼板とは異なり、切削速度を高く設定してもバリ形態が悪化しないので、送り量を抑えつつ、主軸回転数を高く設定することで、ドリルの進行速度である送り速度を高く保つことができる。つまり、加工能率を大きく下げずに、出口バ리를抑制した穴あけ加工を行うことができる。

4. 貫通直前での送り低減加工

超硬ドリルと純アルミ板 A1050 との組み合わせにおいては加工が安定しており、送り量を低くすれば、生成される出口バリの抑制が可能であることから、貫通直前での送り量を低減すれば、送り量低減による加工能率低下の影響を最小限とすることができると考え、その効果を検証した。

超硬ドリル $\phi 2.0$ mm で穴深さがドリル直径の 3 倍となる板厚 6.0 mm の純アルミ板 A1050 に穴あけを行う際に、切削速度を一定の 50 m/min のまま、形態 III のバリが生成する送り量である 0.10 mm/rev でドリル貫通直前まで加工を行い、加工途中で、形態 I のバリが生成する送り量である 0.01 mm/rev へと低減させた。この送り量を切り替える位置を送り低減位置と呼び、この位置を変化させた加工をおこなった。また、送り量を低減するまでの加工は、送り低減位置まで停止することなく一定の送り量 0.1 mm/rev でおこなう連続加工と、1.0 mm ごとに断続加工を行うステップ加工を比較した。このステップ加工は通常のマシニングセンタなどにおいて NC 制御機に標準的に備わっている G73 で設定されているドリルサイクルで設定可能な断続送り動作と同等であり、具体的には、ドリル進行途中に一旦、0.1 mm だけ早送りで素早く上昇することで加工を一度完全に分断し、すぐさまドリルの進行を 0.1 mm/rev で継続させ、分断を開始した位置からさらに 1.0 mm 進行した時点で、再度加工を分断させるために 0.1 mm 早送りで素早く上昇する。これらの動作を繰り返しながら 1.0 mm ごとに断続的な送りを行う断続送り動作をおこなっている。

送り低減位置はドリル先端が底面に到達した位置を 0.0 mm とし、下向きを正とし、ドリル先端が底面に到達する手前の -1.0 mm の位置から底面到達後の 0.9 mm の位置までの範囲において 0.1 mm 刻みで変化させた。ドリル貫通直前での送り低減位置のバリ高さへの影響を図 8 に示す。

低減前が連続加工の場合は、送り低減位置によらず全体的にバリが高く、その大きさはバラついており、送り量の低減によるバリ抑制の効果がほとんど出ていない。一方、送り量低減前の加工をステップ加工とすると、送り低減位置が底面到達後 0.4 mm までバリ抑制の効果が認められる。これらの比較により、連続加工においては、生じた切り屑詰まりが送り量を低減させてからの加工にも悪影響を及ぼしていると推察される。ステップ加工で切り屑詰まりを回避した安定加工を行えば、貫通直前まで高い送り量で加工しても、そ

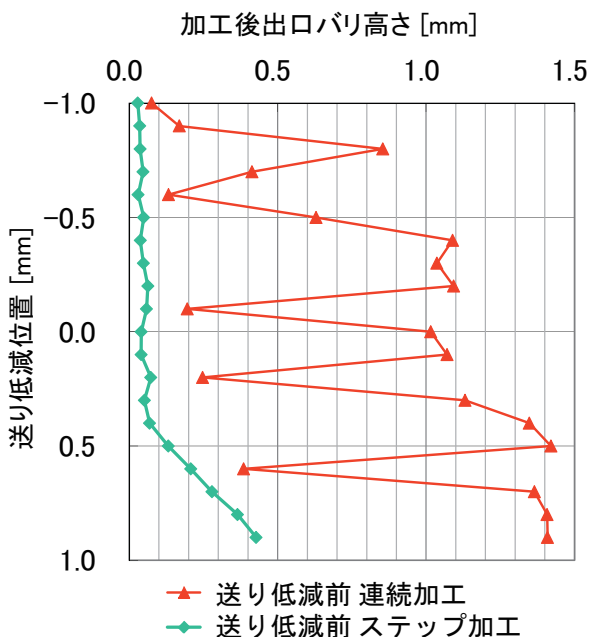


図8 送り低減位置と出口バリ高さ

の後の送り量を低減させることで、十分なバリ抑制効果が得られている。ドリル先端位置 0.4 mm の位置では、被削材の底面の変形がある程度進行しているが、ドリル直径の範囲までには変形が及んでおらず、そこから送り量を低減させた加工を行うことで、以降の被削材底面の変形の進行を最小限としつつ、送り量を低減するまでに変形した部分は最終的にドリルにより除去されるため、最終形態であるバリ形状には残っておらず、十分なバリ抑制効果が得られている。

ステップ加工と貫通直前のみの送り量低減を組み合わせた加工は少々複雑な送り動作となるが、近年加工現場で広く用いられているマシニングセンタなどのNC制御装置を備えた加工機であれば、切削送り動作と早送り動作の組み合わせでプログラムすれば、比較的容易に動作を設定できる。特別な装置や工具などは

不要であり、そのプログラム作業コスト程度の低コストでの実現が可能である。

5. おわりに

ドリルによる貫通穴加工における長年の課題である出口バリの抑制に向けて、まず、切削条件を変化させた貫通穴加工を行い、切削条件によって出口バリの形態が大きく変化することを確認した。バリ形態ごとの生成過程の詳細を調査し、比較することで、ドリル出口バリは底面の変形量とその進展の違いの最終的な結果であり、生成過程における底面変形量をいかに抑制するかが、出口バリの抑制に重要であることがわかった。

また、被削材と工具材の組み合わせによっては、加工状態の悪化による急激なスラスト力の上昇を生じることがあり、その他にも、深い穴加工においては、切り屑づまりによって、バリ形態を悪化させる場合がある。これらの要因をできるかぎり排除することも、バリの抑制には重要である。

加工状態を安定させれば、被削材底面の変形量は送り量のみ依存し、これを抑えることで低減できる。最終的な出口バリの抑制には、ドリル貫通直前の被削材底面の変形を抑えればよいので、ドリル貫通直前のみの送り量を低減させる送り低減加工を行えば、能率を大幅に下げずに出口バ리를低コストで十分に抑制できる。

参考文献

- 1) 竹山秀彦, 加藤俊二, 石渡昭一, 竹治裕幸: 精密工学会誌, **59** (1993) 1719
- 2) 佐久間敬三: ドリル・リーマ加工マニュアル, 大河出版 (1992) 37.