研究

微小径ドリル加工の切残しに及ぼす被削材組織の影響*

菅 原 章** 稲 垣 耕 司**

The Effect of Workpiece Structure on Burr Formation in Micro Drilling

Akira SUGAWARA and Kōji INAGAKI

In this study, the effect of workpiece structure and drill diameter on burr formation in drill working were investigated. The characteristic results are that the burr formation is reduced when the grain size of the workpiece increases, and that this effect of grain size becomes remarkable when the drill diameter is very small and its tool edge shape is bad. These facts are explained as follows: Since the number of crystal grains covered by

drilling part becomes few when the grain size of workpiece structure is large and drill diameter is small, the effect of crystal anisotropy on working stress becomes smaller and the effect of crystal boundary on drilling work per one revolution becomes smaller for micro drill feed. Therefore, the drilling part is easily separated from the workpiece during plastic deformation, and micro drilling with small burr can be worked.

Key words: micro drilling, burr, workpiece structure, crystal grain size, crystal boundary, micro drill feed, drill edge shape.

1. は じ め に

ドリル加工では塑性変形領域としての切残しの部分が被加工穴周辺にみられる。この切残しの部分は、ドリルのチゼル部が被削材に接触して切削が始まると同時に発生し、ドリルの送りとともに円周方向に生成伝播されることがわかった。

この切残しの多少は、①ドリルの刃先形状、②加工条件、③被削材組織の違い、④その他、などによって違ってくる。

前報¹⁾では0.02% C鋼を直径が0.06~2.5 mmのドリルで穴あけをした場合、ドリル直径が0.2~2.5 mmの比較的太いドリルでは、ドリル直径が減少するに従って切残しは増加するが、直径0.2 mm以下の細いドリルでは、直径が減少するに従って切残しは逆に減少することを報告した。前者の挙動はドリル直径の減少に伴う刃先形状の悪化でよく説明できるが、後者についてはその原因が明らかでない。

そこで本報では種々な組織をもつ被削材に種々な径のドリルで穴あけをして、被削材組織の違いが切残しに及ぼす影響を調べ、その結果から、微小径ドリル加工においてその径が細くなるほど切残しが少なくなる現象の原因について考察した。なおその際に上記の実験に先だっ

て程に関する知見をも参考にした。

2. 刃先形状が悪い場合の切残し生成過程

微小径ドリルの刃先形状は図1(a)に示すように非常に悪くなり、切れ刃稜や切れ刃肩が鈍化して、加工力は正常なドリルのように切れ刃に集中したせん断力としてではなく、広い面積に分布した摩擦力として被削材に伝達されるようになる。そこで刃先形状が非常に悪い場合、つまり加工力が完全に摩擦力として被削材に伝達される図1(b)のような円すい台柱形のモデル工具を用いて、塑性変形しやすい鉛板に穴あけをすることによって切残しを顕著に生成させ、ドリル加工における切残しの生成過程を概念的に知るためのモデル実験をした。

実験は図1(b)のモデル工具の直径を5 mmに製作し、厚さ5 mmの鉛板に工具送りを1 mmずつ順に深くしながら穴あけをした。そのときの断面形状と実験条件を図2に示す。この図から、ドリル加工における切残し

(a) 直径0.06mmのドリルの刃先形状

(b) モデル工具

図1 刃先形状の悪い微小径ドリルとモデル工具

* 原稿受付 昭和53年9月4日、昭和49年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和49年10月20日)にて発表。

** 正 会 員 東北大学科学計測研究所 附属 特殊精密工作研究施設(仙台市三条町19番1号)

鉛板厚: 5 mm, モデル工具 $D=\phi 5$ mm, $d=\phi 0.8$ mm, $\theta=60^\circ$,
モデル工具回転数: 5300 rpm, 切削油: なし

図2 モデル工具送りの違いによる鉛板断面形状

の生成過程を推論すると次のように考えられる。

ドリルが被削材に穴あけを開始する最初の1回転による送りで、大部分は切りくずとして排出されるだろうが、このとき生成された切残しは次の1回転による送りで生成された切残しによって円周方向に押し出される。この切残しの生成増殖は、刃先形状の鋭利さの程度によって断続的に、ドリルの切れ刃肩が被削材内部に入り込むまで続けられる。また被削材の抜け側切残しは、ドリルのチゼル部が板厚に到達する以前に生成されはじめ、刃先形状の鋭利さの程度による断続的な生成増殖によって円周方向に押し出される。

このモデル実験による切残しの生成増殖の考え方は、切残し生成の一因であり、被削材組織や加工条件などの違いによっても当然違ってくると考えられる。

このように切残しの生成過程を現象的にとらえて、以下の実験を行った。

3. 実験方法

3.1 切削性

穴あけは各被削材ごとに加工径を変えて行すが、被削材と加工径の違いによる切残しの多少の違いは、切削性という考え方で相対的に比較した。

この切削性については次のように考えた。

切残しのない穴加工状態を考えると、このときには被加工部がすべて切りくず W_s として排出されることになり、この部分の被加工量は被加工穴径、被削材の板厚および比重とから求められ、これを理想加工せん断量 W_i と決めた。しかし実際の加工では図3に示すように、切りくずと切残し W_p とが生成されるために、 W_i はこれらの和となる。そして W_i に対する W_s の割合を切削性と決めた。これらの関係から、切削性が大きい値をとるほど切残しが少なくなり、このときの穴加工は切削性の良い穴あけであると考えた。

被削材と加工径の違いによる切残しの多少の違いを、

$W_i = W_s + W_p$, W_i : 理想加工せん断量
 $S = W_s / W_i$, S : 切削性

図3 切削性の考え方

切削性という考え方で相対的に比較する重要な条件は、ドリル直径と被削材の板の厚さを同じ寸法にすることである。

3.2 被削材料

被削材組織の違いが切残しの多少に及ぼす影響を調べるために、被削材を下記のように大別し、それぞれ以下に述べる条件をもとに被削材を選んだ。

結晶質 — 単結晶体 — 平板状組織
— 多結晶体 — 粒状組織

- (1) 切残しが多く生成されて切削性が比較しやすい。
- (2) 不純物の混入による切削性への影響が少ない。
- (3) 被削材の板の厚さが変化しても、それによる結晶粒の粒径の変化が少ない。

(1)と(2)の条件を満たす被削材としては、0.02% C 鋼や鉄単結晶、(3)の条件では焼結銀板材やSUS 321板材を選んだ。各被削材の製作については次に述べる。また各被削材の名称は以下において、それぞれの見出しの最後に示した記号で表す。

- 1) 粒状組織——0.02% C 圧延鋼板の

熱処理 I (再結晶処理) : Fe(H) I

熱処理 II (結晶成長処理) : Fe(H) II

Fe(H) I は 430°C で 45 min 間保持、その後炉冷、Fe(H) II は 810°C で 2 h 保持後炉冷して製作し、板厚はそれぞれ同じ寸法の 6 種類 (2.5, 1.1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.06 mm) である。Fe(H) I および II の平均結晶粒径は板厚 2, 1, 0.5, 0.1 mm から求めたが、それぞれ 30.5, 28.7 μm である。

- 2) 平板状組織——0.02% C 圧延鋼板: Fe(R)

平板状の結晶粒をもつ組織の切削性を検討するために 0.02% C 圧延鋼を、上記熱処理材の各板厚と同じ寸法に圧延して被削材とした。この場合 2.5 mm の厚さから 0.06 mm まで直接圧延することは加工度が非常に大きくなり不可能である。そこで結晶粒の大きさをできるだけそろえるように留意しながら、圧延加工を何段階にも

分けて焼きなましをして被削材を軟化させ圧延加工を行った。

3) 粒状組織——焼結銀板: Ag

結晶粒の大きさができるだけそろった被削材として、銀粉末を圧縮成形し焼結した焼結銀板を用いた。板厚 0.41 mm の焼結銀板を圧延加工し、0.41, 0.32, 0.2, 0.17, 0.1, 0.05 mm と 6 種類の板厚を準備した。この被削材の平均結晶粒径は 15.6 μm である。

4) 粒状組織——SUS 321 板: SUS

平均結晶粒径が比較的小さく、その大きさがそろっている被削材としてオーステナイト系ステンレスに Ti が入っている SUS 321 材を選んだ。焼入温度を変えながら顕微鏡組織を調べた結果、1100°C における水焼入組織の結晶粒径は大きいもので 5 μm 、平均 2.3 μm と微細な結晶粒組織となっていることがわかった。そこでこの組織をもつ 6 種類の板厚 (2, 1, 0.5, 0.25, 0.1, 0.06 mm) を準備した。

5) 単結晶体——鉄単結晶: Fe(S)

単結晶体の被削材として鉄単結晶を選んだ。被削材は加工によるひずみの影響を受けないように、電解研摩法を用いて準備した。単結晶体の穴あけでは被加工面の結晶方位により切削性が影響されることが考えられるので、方向性の異なる三つの面をそれぞれもっている 7 種類の板厚 (1.8, 1.5, 1, 0.6, 0.3, 0.1, 0.05 mm) の鉄単結晶板を準備した。

3.3 ドリル

この実験に用いたドリルは図 4 に示す刃先形状をもつ市販の高速度鋼製のツイストドリル (直径 2.5 mm から 0.05 mm のドリル) である。この図から、ドリル直径が小さくなるにつれて刃先形状は切れ刃や切れ刃肩が大きく丸味半径をもち、切れ刃の直線性や切れ刃自体の鋭利さが失われていることなどがわかる。

図 4 ドリル径の微小化に伴う刃先各部形状の傾向

3.4 加工条件

穴あけはセンタ穴あけなしで、少し加工してはドリルを引上げて切りくずを排出し、また穴加工を始めるという方法で切削油を用いて手送りで行った。1本のドリルは、摩耗などによる切削性への影響を少なくするために、1個の穴あけにだけ使用した。また各径ドリルの回転数、送り速度などは表 1 に示すが、これらの値は次の考え方を基本として決めた。

- (1) ドリル直径が小さくなるほど高回転にしなければならないが、実際の加工で高回転はあまり推奨されていない²⁾ので、最高回転は 6000 rpm とした。ド

表 1 ドリル径と回転数および送り速度との関係

ドリル直径 (mm)	回転数 (rpm)	送り速度 (mm/min)	被削材 (ドリル直径順)
2.5, 2.0, 1.8	2000	11.58	(Fe(R), Fe(H)), SUS, Fe(S)
1.5, 1.1, 1.0	2400	7.68	Fe(S), (Fe(R), Fe(H)), (SUS, Fe(S))
0.6, 0.5	2800	4.26	Fe(S), (SUS, Fe(R), Fe(H))
0.41	880	4.26	Ag
0.32	1130	0.1074	Ag
0.3, 0.25, 0.2	3800	0.1074	Fe(S), SUS, (Ag, Fe(R), Fe(H))
0.41, 0.32, 0.17, 0.1, 0.05	3800	0.1074	Ag
0.17	2120	0.1074	Ag
0.1	3800	0.1074	Ag
0.1	4800	0.0702	Fe(S), Fe(R), SUS, Fe(H)
0.06, 0.05	6000	0.0386	(Fe(R), SUS, Fe(H)), (Fe(S), Ag)

Fe(S): 鉄単結晶板, Fe(R): 0.02% C 圧延鋼板, Fe(H): 0.02% C 圧延鋼板熱処理 I, II 材, SUS: SUS 321 板, Ag: 焼結銀板

図5 加工径の微小化に伴う各被削材組織の切削性

リル直径と回転数との関係は Levin の推奨値³⁾をもとにして、ドリル直径があまり変わらないドリルでは同じ回転数で加工を行った。

- (2) ドリルの送りは連続切りくずが生成される加工状態を基本に穴加工を行い、加工時間の積算と（切りくず排出のための時間を除く）ドリルの送り距離からドリルの送りを算出し、ドリルの回転数が同じでドリル直径にあまり差のないドリルでは同じ送りでも穴あけをした。
- (3) 焼結銀板の推奨加工条件はわからないので、周速一定と一定回転と2方法で穴あけをして切削性を比較する方法をとった。

4. 実験結果と考察

図5は表1の加工条件で各被削材に穴あけをしたときの各被削材組織の切削性を示している。Agの切削性は、前述の2方法で穴あけしたが、どちらも同じ傾向を示すので一定回転による結果を示した。またFe(S)については前述のように結晶の方向を変えて実験を行ったが、方向性の影響は顕著に現れなかったので、図5には3方向の実験結果の平均値で示した。

この図から各被削材の切削性は、ドリル直径が小さくなるにつれて次の三つの傾向に大別できる。

- (1) あまり変化がみられない: Fe(S)
 - (2) 次第に悪くなるが、あるドリル径で最小となり、ドリル径がもっと小さくなるにつれて次第に向上する: Fe(H) I, Fe(H) II, Fe(R), Ag
 - (3) 次第に悪くなる: SUS
- 次に上記の3傾向について詳述する。

4.1 Fe(S) の切削性

Fe(S)の切削性は図5からわかるように、直径0.3 mmのドリルによる切削性が他の径の穴あけよりも数%良くなっているものの、加工径の大小にはあまり関係なくほぼ一定である。

この原因については次のように考えられる。

Fe(S)の被削材は結晶粒界を持たないため転位の移動、ひいては塑性変形に対する拘束が少ない。したがってドリルの刃先形状の良否にかかわらず、刃先部だけ、あるいはドリルによる被加工面内に局部的な塑性変形を生じさせようとする、必然的に転位が被加工部外に移動して塑性変形領域が拡大する。そのために被加工面の外周近傍に応力集中することもなく、またそこでの塑性分離も生じにくい。そしてこの変形に伴って被加工部の材料は外部へ押し出される。このように考えるとドリル直径の違いにかかわらず、切残しが比較的大きく、切削性が一定していることをよく説明できる。

4.2 Fe(H) I, Fe(H) II, Fe(R), および Ag の切削性

これらの被削材の切削性はドリル径に対して類似の傾向を示す。すなわち、あるドリル直径 $D_{\min}$ で切削性が最小値となり (Fe(H) I; $D_{\min} = \phi 0.2$ mm, Fe(H) II; $D_{\min} = \phi 0.5$ mm, Fe(R); $D_{\min} = \phi 0.2$ mm, Ag; $D_{\min} = \phi 0.17$ mm), それより太いドリルではドリル径が小さくなるに従って切削性が低下し, $D_{\min}$ 以下のドリルでは直径が小さいドリルになるに従って逆に切削性が向上する。

このような傾向はFe(H) IおよびII, Agのように比較的大きな結晶粒をもった被削材の穴あけにのみ見られることから、この現象は被削材の結晶の大きさが原因として起こるのではないかと考えられる。

そこで切削性の向上が顕著にみられる被削材Fe(H) I, IIの顕微鏡組織を調べ、これらが加工径との関係で切削性にどのような影響を及ぼすかについて考察する。

図6はFe(H) IおよびIIの顕微鏡写真であるが、大きな結晶粒の近傍に小さな結晶粒があるというように結晶粒の大きさは不ぞろいである。この状態は熱処理温度と結晶成長の過程から当然のことであるがFe(H) II材に多くみられる。このような各板厚の顕微鏡写真をプロジェクタで拡大して、測定面積(0.125 mm×0.085 mm)中の結晶粒数を数え、この中の一番大きい結晶粒の面積および結晶粒界の長さを測定した。

これらの測定結果から、各径のドリル加工における被加工面（ドリル半径の2乗×円周率）内の結晶粒数、平均結晶粒径、結晶粒界の長さおよび後述する結晶占有比

図6 板厚 2mm の Fe(H) I および II の顕微鏡写真

図7 Fe(H) I および Fe(H) II の各板厚における諸性質

などを計算し、Fe(H) I および Fe(H) II 材の各板厚の諸性質として図7に示す。ただし板厚 0.06 mm の各値は板厚 0.1 mm の数値から推定した。またこれらの被削材の切削性、SUS 材および Ag 材を用いた穴あけにおける各径の被加工面に含まれる結晶粒数もあわせて示した。

結晶占有比は、図6にみられるような結晶の大きさの不均質な組織を加工径との関係で評価する方法として、測定面積中の一番大きい結晶粒の面積が被加工面に

占める割合とした。

図7から、加工径が小さくなるにつれて被加工面内の結晶粒数が少なくなり粒界の長さも短くなるが、加工径が小さくなるため被削材各板厚の結晶占有比は次第に大きくなり、これらの交錯範囲より細いドリルの(薄板を用いた)穴あけで切削性が向上しているのがわかる。

以上のことを参考にしてドリル直径と切削性との関係を考察する。

1) ドリル直径が D_{min} より大きい範囲

理想的なドリル加工では加工力が刃先に集中したせん断力として被削材に加わり、その集中応力が被削材に塑性分離を起こさせる。ドリル直径が大きい穴あけではこのようにいわゆる切削が行われるが、ドリル直径が小さくなるにつれて刃先形状が図4に示したように悪くなるために、加工力は集中応力としてではなく表面に分布した摩擦力として被削材に伝達されるようになる。このときの穴あけは2章で示したモデル工具実験に近い状態になる。この状態で穴あけ加工が進行するためには被加工面で摩擦力による塑性変形が必要になる。ところがこの場合被削材の結晶粒は、図7に示したようにドリル直径に比べて小さく、お互いに拘束しあっているため被加工部だけでの塑性変形は不可能で、4.1節で述べた Fe(S) の場合と逆の意味で塑性変形領域は被加工部外に拡大する。このとき塑性ひずみは結晶粒同志の拘束によりドリル外周部に集中しにくいため、そこでの塑性分離が生じにくくなり被加工部の材料は外部へ押し出され切削性は低下する。

2) ドリル直径が D_{min} より小さい範囲

この範囲ではドリル径が細くなるために被削材の結晶粒の寸法がドリル直径に近づき、被加工面に含まれる結晶粒数が少なくなり、被加工部内では前述の Fe(S) の塑性挙動と同じ理由から塑性変形が容易になる。ところが一方では被加工部の外周近傍に、塑性変形を阻止する結晶粒が存在するため、その拘束により塑性変形領域が拡大されにくくなる。このことは塑性ひずみがドリルの外周部に集中することを意味すると考えられる。このためその部分では塑性分離が生じやすくなり切削性が向上する。

以上のことは結晶粒が比較的大きい Fe(R) および Ag 材の塑性挙動の説明にもよくあてはまると考える。なお平板状組織 Fe(R) の D_{min} 以上のドリル直径における切削性の挙動は前述したこと以外に、薄板になるに従って結晶粒の細分化はある程度避けられず(3.2.2項で述べたようにできるだけ結晶粒の大きさをそろえるように留意したが)、その影響も含まれていると考えられる。

表2 ドリル径の違いによる
ドリル1回転の送り

ドリル直径 (mm)	ドリル1回転の送り ($\mu\text{m}/\text{rev}$)
2.5	5.79
1.1	3.19
0.5	1.52
0.2	0.028
0.1	0.0146
0.06	0.0064

4.3 SUSの切削性

SUS 321 材の切削性は図5からわかるように、ドリル直径が小さくなるにつれて次第に悪くなっている。

この原因については次のように考えられる。

ドリルの刃先形状はSUSの場合もドリル直径が小さくなるにつれて悪くなり、それとともに切削性は4.2節で述べたドリル直径 $D_{\min}$ まで低下する理由と同じ原因で低下する。しかしこの場合はSUSの結晶粒が微細であるため、ドリル直径が小さくなくても、図7に示したように被加工面に含まれる結晶粒数が非常に多い。そのため4.2節で述べたようにドリル径が $D_{\min}$ 以下のような現象は生じないために、切削性は単調に低下すると考えられる。

4.4 ドリル送りの影響

本実験では表1に示したように、ドリル径を細くするに伴って送り速度を減少させて穴あけ実験をしている。したがってドリル1回転あたりの送りは表2に示すように小径ドリルほど小さくなり、この送りの違いは切削性に影響を与えると考えられる。しかし送り速度の減少はFe(S)およびSUSの場合も同じであるから、4.2節の被削材にみられる微小径ドリルでの切削性の向上は、主として被削材組織に起因すると考えるのが妥当と考えられる。しかし送り速度の減少は、ドリル1回転中の被加工領域に存在する結晶粒界を減少させ、結晶粒が大きい

被削材ではさらに結晶粒界を減少させることになるので、微小径ドリル加工において切削性の向上を助長すると考えられる。

5. ま と め

刃先形状が悪い微小径ドリル加工において、切残しが少なく切削性の良くなる現象を解明するための一つの試みとして種々な組織をもつ被削材に加工径を変えて穴あけを実験した。

実験の結果、上記現象を顕著に示した被削材は粒状組織で比較的結晶の大きい被削材であった。

この原因については、単結晶体と多結晶体との切削性の比較から次のように考えられる。

- (1) 単結晶体では、転位の移動を妨げる結晶粒界が被加工面から遠く離れ、塑性流動範囲が大きくなるため切残しは比較的大きく、ドリル径にかかわらず一定している。
- (2) 結晶が比較的大きい多結晶体では、被加工面に含まれている結晶の数が少なく、結晶の異方性によるすべりの阻止の影響は少なくなる。そのため加工力によって被加工面は塑性変形しやすい状態になるが、被加工面の近傍に各結晶粒の粒界があるために、塑性流動は阻止され塑性分離しやすい状態になる。また極微小送りによる極微量切削は少ない転位の移動ですむために、切削性を良くする一因になると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 菅原 章, 稲垣耕司: ドリル加工におけるドリル径の微小化に伴う刃先形状の影響——0.02% C 鋼における切残し, 精密機械, **44**, 2 (1978) 179.
- 2) 塚田為康: ドリル加工, 精密機械, **37**, 1 (1971) 33.
- 3) 志茂主税: ドリルによる微小穴あけ, マシナリ, **26**(1963) 1461.