アルミニウム合金のドライ穴加工における 切りくず排出過程の可視化と分析*

-切りくず排出過程に及ぼすねじれ角の影響-

瀬川俊明** 笹原弘之*** 鍵谷 夕† 新植壮一†† 堤 正臣***

Visualization and Analysis of Chip Ejection Process in Dry Drilling of Aluminum alloy
-Influence of Helix Angle on Chip Ejection Process-

Toshiaki SEGAWA, Hiroyuki SASAHARA, Yu KAGIYA, Soichi ARAMAKI and Masaomi TSUTSUMI

We developed a new visualization method that enables to observe the chip ejection process continuously in dry drilling. The work piece material is inserted to the clear tube then the drill removes only the workpiece as a chip. This process was observed by a high-speed camera from the outside of the clear tube. The diameter of the workpiece and the inner diameter of the clear tube is almost same size and the drill diameter is smaller than them 0.1mm. Comparing three kinds of drills that have different helix angles 15, 30, 40 degrees, it was observed that the chip ejection speed using 40 degrees helix drill is the fastest in these drills even though the ejection route along the flute is the longest. To confirm the effect of the roughness of the inner surface of the hole to the chip ejection process, conventional dry drilling of aluminum alloy was also carried on. It was found that the segmented chip is formed if high helix angle drill is used but the chip jam doesn't occurred until the hole depth reaches to three times of drill diameter. As a result, a high helix angle drill is suitable for the dry drilling of aluminum alloy.

Key words: dry drilling, aluminum alloy, helix angle, visualization device, chip ejection, chip formation

1. 緒 言

近年、環境問題への関心の高まりから切削加工分野においても、ドライ化、MQL化などのいわゆる環境に配慮した加工方法が盛んに研究され^{1)~3)}、その一部は、すでに実用化されている。

一方、アルミニウム合金は工具に対する凝着性が高いため未だにドライでかつ高効率、高品質な穴加工を安定的に行うことは困難とされている。しかしながら、アルミニウム合金に対するドライ穴加工が可能となれば、例えば、航空機の組立作業における数十万のリベット穴加工をドライ化することが可能となり、その効果がもたらす生産効率の向上は非常に大きい。

穴加工における切りくず排出性は、生成される切りくず形態、切りくずの排出経路となるドリルの溝形状及び加工された穴内面の粗さによって決定されると考えられる。切れ刃部での凝着及び溝部での切りくず詰まりを防止する手段として、DLC(Diamond like carbon)コーティングの高い平滑性と潤滑性には期待が寄せられている^{4)~6)}。また、同様の理由で溝内面を研摩したドリルの有効性評価なども行われている。しかしながら、これらの方法を用いてもドライ穴加工でアルミニウム合金の凝着を完全に防止するまでには至っていない。したがって、切りくず生成の視点からも切りくず詰まりが生じにくい条件や工具形状を明らかにし、切りくず排出性を向上させることが、アルミニウム合金のドライ穴加工を実現する上で重要となる。

ねじれ刃ドリルの切削において、切りくず形状は浅穴加工時の円すいらせん形から遷移折断面型あるいは長ピッチ形に変化することはよく知られている⁷⁾。これまでに、広田・笠原は横向きカーブを考慮した切削模型を提案し、穴が浅い初期段階もしくは切りくずとねじれ溝の衝突が無い場合に限られるが、エネルギー解法により切りくず生成状態を詳細に検討している¹⁰⁾¹¹⁾。ま

た、細井らは独自のチゼル形状を有するドリルを用いて、炭素鋼を油剤を使用して切削した場合の、切りくず生成及び排出について急停止法により実験的に調べ、円すいらせん形から遷移折断面形、長ピッチ形に変化する状態について論じている¹²⁾。

しかしながら、切りくず排出過程を観察しようとする場合、アルミニウム合金のドライ穴加工では、上記の実験条件よりも凝着が生じやすいこと、予備実験では穴深さが大となると長ピッチ形の連続切りくずはほとんど生じず折断しやすかったことを考慮すると、急停止装置を用いた場合には刃先付近におけるある瞬間の切りくず生成状態は観察できても、ドリル溝内を排出されていく切りくずの挙動を連続的に観察することはできないと判断した。

そこで本研究では、透明チューブを用いた切りくず排出過程可視化装置を開発し、アルミニウム合金の穴加工における切りくず生成や加工穴深さの増加による切りくず形態の変化、溝部における切りくず排出状態を連続的に観察することを可能とした。これによって、上記研究ではほとんど触れられていないドリルねじれ角の違いによる切りくず排出速度及び排出性への影響を調べた。本報告では、(1)開発した可視化装置により、これまで不可能であった穴加工の切りくず排出過程を連続的に観察することが可能であること、(2)ねじれ角大のドリルの方がねじれ角小のドリルより切りくず排出速度が大で、排出経路が長くとも切りくず排出性が良好となることについて明らかにしたので報告する。

2. 可視化装置による切りくず排出状態の観察

2.1 可視化装置

図1に本研究で開発したドリル加工時の切りくず排出過程可視化装置を示す。また本実験装置内での穴加工の状態を図2に示す。本装置の特徴は、透明チューブに被削材が挿入してあり、チューブ内径とほぼ同じ径のドリルで加工を行うことにより、切りくず排出過程が外部から観察できる点にある。なお、ドリルは挿入されている被削材のみを加工し、透明チューブを加工

* 原稿受付 平成16年8月11日

** 正 会 員 ジャイトコ(株)(東京農工大学大学院)
(静岡県富士市今泉700-1)

*** 正 会 員 東京農工大学大学院(小金井市中町2-24-16)

† 住友電工ハードメタル(株)(兵庫県伊丹市昆陽北1-1-1)

†† 東京農工大学(現、富士重工業(株))

Fig. 1 Chip ejection visualization apparatus

Fig. 2 Schematics of experimental procedure

することはない。切りくず排出過程の観察は図2に示すように、ドリルのチゼルが被削材に接触し、切りくず生成が開始された時点から、切れ刃全体が被削材の加工を開始し、外周コーナが被削材に完全に入った後、充分に加工される穴深さ1D相当となる7.7mmまでとした。切りくずの排出状態を可視化するための透明チューブの穴内面は、実際の金属材料の穴内面とは面粗さ、潤滑性などの点で異なるが、本実験ではねじれ角と切りくず排出状態および切りくず排出速度の関係を調べることが目的としており、ねじれ角の影響を相対的に評価するには問題ないと考えた。

今回の実験では透明チューブにアクリル製のものを使用した。使用したアクリルチューブは内径が7.8mmで使用するドリル径より0.1mm大きい。透明チューブはドリルと干渉しないことを確認した後、鋼製の台座にボルトで固定した。さらに穴加工中の振れ回りを防止するため、被削材下部側面にフラット面を設け、この部分を治具側面からM6ボルトで押さえた。切りくずの排出状態を、より正確に把握するためフレームレート1000fpsで高速度カメラを用いて撮影した。

2.2 切りくず排出速度と切りくず排出状態

本研究では航空機用材料として多用されているアルミニウム合金圧延材7075-T7351を実験材として使用とした。表1及び表2には実験材の化学組成及び、機械的性質をそれぞれ示す。7075-T7351は亜鉛系のアルミニウム合金で引張り強度が450MPaを超える強度を有する。

図3に可視化実験に用いたドリルを示す。実験にはねじれ角15度、30度、40度の3種類のドリルを使用した。表3に各ドリルの仕様を示す。本実験には可視化に用いたアクリルチューブ内径に合い、かつ小径でも観察が比較的容易となるドリルを選定した。使用したドリルはφ7.7mmの高速度工具鋼製であり、コーティングは行っていない。先端角についてはねじれ角15度及び30度のドリルが118度、ねじれ角40度のドリルが130度である。先端角が違ふことで、異なる切りくず形態となり、切りくず排出性に違いが生じる可能性を考慮し、次章において実加

Table 1 Chemical composition of Al 7075 (mass%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr+Ti	Other	Al
0.4	0.5	1.2	0.3	2.1	0.18	5.1	0.2	0.25	0.15	Remainder

Table 2 Mechanical properties of Al 7075-T7351

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Thickness (mm)
393	476	8	6.35-25.4

Table 3 Drill specifications

Overall length	mm	117
Drill diameter	mm	7.7
Point angle	°	118, 130
Flute width rate		0.5
Core thickness	mm	1.54
Tool material		HSS
Coating		Non-coating
Drill helix angle	°	15, 30, 40

Table 4 Drilling conditions

Spindle speed	min ⁻¹	2500
Feed rate	mm/rev	0.14
Depth of hole	mm	7.7
Type of drilling		Non-step
Cutting fluid		Dry

Fig. 3 Photographs of tested drills

工により、先端角が同一でねじれ角が異なるドリルを用いて切りくず排出性及び切りくず形態も調べた。なお実加工では、より製品加工に近い径として航空機用リベットサイズの中でも最も一般的な径に近いφ4mmのドリルを使用した。したがって、可視化と実加工ではドリル径が異なっているが、これについては、相対的に各ドリル径におけるねじれ角と切りくず排出性の関係を比較する上では問題ないと考えた。

実験条件は表4に示すとおりである。主軸回転速度は2500min⁻¹、送り速度は0.14mm/rev一定とし、穴深さ7.7mmまでの止まり穴加工を行った。透明チューブ上端から、被削材加工面までの距離は、ねじれ角15度及び40度のドリルが約20mm、30度のドリルが30mmである。なお主軸回転速度に関しては、アルミニウム合金を穴加工する条件にしては遅いものであるが、高速度カメラを用いて観察しやすい条件であること、航空機部品の穴加工に近い切りくず排出状態を再現できることを予備実験により確認し、本実験の主軸回転速度とした。

図4に各ねじれ角のドリルによる切削時の切りくず排出状態の高速度写真を示す。写真中の切りくずには切りくず排出状態を見易くするため、縁取りを行った。ドリル一回転の時間は約

Fig. 4 Photographs of chip ejection

Fig. 5 Relationship between helix angle and chip ejection

25ms であるので、そのほぼ整数倍となるフレームを示した。なお、論文電子媒体にはムービーを掲載している。図を見ても分かるように、今回の可視化装置を用いることで、いずれのねじれ角のドリルによる切りくず排出状態もはっきりと観察できる。図中、水平方向の線は切りくず排出速度の測定基準を表し、この線からの切りくずの垂直方向の距離及び経過時間によって切りくず排出速度を求めた。ねじれ角 15 度のドリルでは、加工初期に特徴的な円すいらせん形の長くつながった切りくずが見られず、カール径が小さく直線的な一見長ピッチ形の切りくずが、ドリルの溝内面と摩擦しながら上昇の様子がみられる。これに対して、ねじれ角 30 度のドリルでは穴加工の初期に生成された円すいらせん形切りくずが透明チューブの上端まで押し上げられている様子がみられる。ねじれ角 40 度のドリルでは、溝内部にカール径が小さく細かく分断された円すいらせん形あるいは遷移折断形の切りくずが堆積しており、穴加工深さの増加とともに順次生成される切りくずによって押し上げられている様子がみられる。以上のような結果から、ねじれ角 15 度及び 30 度のドリルでは比較的長い切りくずが生成されており、このような形態の切りくずは生成と同時に成長しながら長く伸びることによって排出されていることが分かる。これに対して、ねじれ角 40 度のドリルで見られるように切りくずが細かく分断される場合には、細かく分断された切りくずが溝部に堆積しながら排出されていることが分かる。

図 5 は、切削開始後、切れ刃によって最初に生成された切りくずと、図 4 に示した基準線との垂直方向距離を、経過時間に対して示したものである。それぞれのグラフの傾きから、ねじれ角 40 度のドリルが最も速い結果となっている。また、

ねじれ角 40 度のドリルでは、ねじれ角 15 度のドリルとともに切りくず排出速度が安定している。一方、ねじれ角 30 度のドリルでは切りくず排出速度が安定せず、測定点ごとに速度の変動が見られる。これは排出される切りくずが穴内面との摩擦により引っかかり、スムーズに流れたりしていることが原因と考えられる。なお、このねじれ角 30 度のドリルの排出状態については、加工開始点から測定点までの距離がねじれ角 25 度及び 40 度のドリルより長いことが影響しているとも考えられる。

以上のような結果から、切りくず排出速度はねじれ角により変化することが分かった。今回の実験では、ねじれ角 40 度のドリルが他のねじれ角のドリルと比較して、いわゆる切りくず排出経路が最も長くなるにもかかわらず、軸方向の排出速度は最も速く、切りくず排出時間は最も短い結果となった。

Table 5 Drill specifications

Overall length	mm	90
Drill diameter	mm	4.0
Point angle	°	118
Flute width rate		0.5
Core thickness	mm	0.8
Tool material		HSS
Coating		Non-coating
Drill helix angle	°	25, 31, 40

Table 6 Drilling conditions

Spindle speed	min ⁻¹	4500
Feed rate	mm/rev	0.14
Depth of hole	mm	4, 8, 12
Type of drilling		Non-step
Cutting fluid		Dry

Fig. 6 Relationship between helix angle and chip ejection ratio

(a) Helix angle 25 degrees

(b) Helix angle 31 degrees

(c) Helix angle 40 degrees

Fig. 7 Relation between helix angle and chip forms

Fig. 8 Relation between helix angle and thrust force

3. 実加工におけるねじれ角の影響

3.1 切りくず排出量に及ぼす影響

前章の可視化実験では穴内壁がアクリルであり、前述したとおり面粗さ、潤滑性の点では実加工と異なる。そこで、実加工においてねじれ角が切りくず排出状態に及ぼす影響を調べた。ねじれ角は切れ刃のすくい角を変化させ、切りくず生成における切りくず厚さ、カール半径などを決定する重要な要因である。また、生成される切りくず形態は排出性にも大きな影響を及ぼす。

表5に実験に用いたドリルの仕様を示す。ここでは、ねじれ角25度、31度、40度のドリルを使用した。表6に実験条件を示す。なお、ここで設定した穴加工条件は油剤を使用した場合に穴内面粗さなどの品質が、アルミニウム合金製航空機部品として安定した結果を得られるものを採用した。主軸回転速度は4500 min⁻¹、送り速度は0.14mm/rev一定とした。

実験では、ブロック形状の実験材料をバイスに固定し、垂直上方からステップ送りせず一定送り速度で加工した。加工する穴は止まり穴とし、切削油剤は使用していない。穴加工中に排出される切りくずは、バイスのロ金にセットした樹脂製の切りくず回収ボックスによって収集した。穴加工深さは表に示す通り4mm、8mm、12mmとし、ドリルを各穴加工深さの最深部で停止させ、その時点で切りくず回収ボックス内に排出されている切りくずを収集し質量を測定した。この状態でドリル溝に堆積している切りくずはそのまま穴内に存在していることになる。なお実験には立て形マシニングセンタを使用した。

各ドリルの切りくず排出量と穴加工深さの関係を図6に示す。図には比較のため加工する穴の除去体積から求めた質量を併せて示す。したがって、計測された切りくず量と除去質量が一致する場合には、穴内部に残留している切りくずが無いことを意味し、これとは逆に除去質量と排出量に差がある場合には、切りくずがドリル溝部に堆積し穴外に排出されていないことを意味している。

同図より、穴加工深さが1Dに対応する4mmの場合には、排出される切りくず量にねじれ角の違いによる差は見られず、いずれの場合も切りくずはわずかな量しか穴内部に残留していないことが分かる。これに対して、穴加工深さが8mm以上になるとねじれ角によって切りくず排出量に差が見られ、ねじれ角が25度、31度、40度と大きくなるにしたがって、切りくず排出量が増加していることが分かる。特にねじれ角40度のドリルによる切りくず排出量は、計算による切りくず排出量とほぼ同じ直線上にプロットされており、加工中に生成された切りくずは、今回実験したどの穴加工深さにおいてもわずかな量しか穴内部に

残留していないことが分かる。

なお、前章の可視化実験では、加工穴深さ 1D 程度でもねじれ角の違いによって排出性に良否が生じているが、これは可視化実験での穴加工では被削材上面が既にアクリルチューブの内部にあり、加工開始直後からアクリルチューブ壁面の存在が切りくず排出状態に影響するためである。これに対して、実加工では平面部端面に対し穴加工しているため、1D 程度の穴深さでは切りくずが穴内面に拘束される部分もごくわずかであり、ほとんどの切りくずが堆積することなく、生成されると同時に排出される結果となり、ねじれ角の影響が現れなかったものと考えられる。

3.2 切りくず形態に及ぼす影響

図 7 に各ねじれ角のドリルで穴深さ 4mm 及び 12mm の穴加工を行った時に排出された切りくずを示す。穴深さ 4mm で排出された切りくずは円すいらせん形もしくは遷移折断形であり、ドリル形状の差による大きな違いは見られない。これに対して穴深さ 12mm の場合では、加工初期の切りくずと底近くで生成した切りくずとが混在しているが、穴深さ 4mm の場合と比較すると、カール径が大きく直線的な切りくずが多いことが分かる。また、ねじれ角が小さくなるほど切りくずカール径は大きくなっている。逆に、ねじれ角が大きい 40 度のドリルによる切りくずは平均的にカール径が小さく、細かく分断されている。

3.3 軸方向加工力に及ぼす影響

図 8 に各ねじれ角のドリルで穴深さ 12mm の穴加工を行った場合の軸方向加工力を示す。図より明かなように、ねじれ角 31 度及び 40 度のドリルでは、2D 相当となる穴加工深さ 8mm 程度までは、軸方向加工力の急激な増大は見られず、約 150N から 250N の範囲内で穴加工深さの増加と共に緩やかに増加している。このような加工力の推移は、油剤を使用した場合の軸方向加工力の推移と類似している。これに対してねじれ角 25 度のドリルでは穴加工深さが 7mm 程度を超える辺りから軸方向加工力に急激な増加が見られる。さらに加工が進み、穴加工深さが 2.5D 相当となる 10mm 前後の部分ではさらに状況が変化する。ねじれ角 40 度のドリルでは平均的に乱れが小さいものの、ねじれ角 25 度及び 31 度のドリルでは軸方向加工力に非常に大きな乱れが見られる。特にねじれ角 25 度のドリルでは、穴加工終了直前で最大の約 400N となっている。

4. ドライ穴加工におけるねじれ角の影響に関する考察

アルミニウム合金のドライ穴加工では、ねじれ角が小さい場合、一見長ピッチ形のような切りくずが排出されるが、実際には長ピッチ形と円すいらせん形あるいは遷移折断形の切りくずが幾重にも重なり合って、部分的にはドリル溝及び加工壁との強い摩擦で凝着状態となった塊状の切りくず形態であり、切りくず詰まりを生じる可能性が大である。このような、ねじれ角が小さい場合の切りくずとドリル溝や加工壁との強い摩擦、および切りくず詰まりについては、軸方向加工力において最大約 400N の激しい乱れが見られることから明らかである。

これに対してねじれ角が大きい場合には、安定して短ピッチの円すいらせん形あるいは遷移折断形の切りくずが排出されている。前述したとおり、通常は長ピッチ形の切りくず形態の方が排出性は良好であると考えられるが、短ピッチの円すいらせん形あるいは遷移折断形であっても、切れ刃部での切りくず生成により順次押し上げられて詰まることなく排出が可能であれば排出性は良好であり、ねじれ角が大きい場合にはこのような排出形態となっている。これについては軸方向加工力の測定結

果及び可視化実験からも明らかである。ねじれ角が大きい場合の軸方向加工力は、前述したねじれ角が小さい場合の軸方向加工力と比較して非常に安定している。また、可視化実験においても、細かく分断された切りくずがスムーズに排出されている様子が観察できた。さらに、ねじれ角が大きい場合は、ねじれ角が小さい場合と比較して切りくず排出速度も速く、切りくずが排出されるまでの速度低下もない。以上の点から、アルミニウム合金のドライ穴加工にはねじれ角が大きいドリルが有効であると考えられる。

5. 結 言

本研究では、ドライ穴加工を実現する上で最も重要となる切りくず排出性について、これに大きな影響を及ぼすドリルのねじれ角に着目し、可視化装置を用いることで切りくず排出状態の観察を行うと共に、実加工においても切りくずの排出状態と加工力の測定を行った。その結果、以下のような結論を得た。

- 1) 可視化装置を用いることで、これまでは不可能であったドリルの穴加工中における切りくず排出状態を連続的に観察することが可能となった。
- 2) ねじれ角 40 度のドリルによって生成される切りくずの排出速度は、ねじれ角 15 度及び 30 度のドリルよりも速く、なおかつ穴加工中の速度低下もない。また可視化実験でも明かなように、生成される円すいらせん形及び遷移折断形の切りくずは排出性も良好である。以上の観点から、アルミニウム合金のドライ穴加工にはねじれ角の大きいドリルが有効である。
- 3) 強ねじれ角のドリルを用いたドライ穴加工では、適度に分断された切りくずが、切りくず生成と同時にフルート内部に堆積される排出形態となるが、切りくず排出性は弱ねじれ角のドリルより良好である。

謝 辞

本研究の遂行に協力いただいた東京農工大学卒研究生、西原麻希氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 佐藤潤幹, 稲崎一郎, 若林利明: 極微量切削液供給による旋削加工, 日本機械学会論文集 (C 編), **62**, 604 (1996) 272.
- 2) 笠原弘之: オイルミスト供給による高速エンドミル加工時の工具磨耗への影響, 精密工学会誌, **66**, 1 (2000) 80.
- 3) 陳徳成, 鈴木康夫, 酒井克彦: 複合ミスト供給法による旋削加工の研究, 精密工学会誌, **67**, 6 (2001) 922.
- 4) T. Nakamura, T. Matsubara, F. Itoigawa and K. Kawata: Oil Film on Water Fog Metalworking Fluid, Initiatives of Precision Engineering the Beginning of a Millennium (2001) 269.
- 5) 河田圭一, 中村隆, 松原十三生, 佐藤豊: 油膜付水滴加工液を用いたエンドミル加工の加工精度, **69**, 9 (2003) 1342.
- 6) 園部勝: DLC 膜の切削工具への適用, トライボロジスト, **47**, 11 (2002) 35.
- 7) 津田圭一, 福井治世, 森良克: アルミ切削用 DLC 膜の開発, 砥粒学会誌, **46**, 5 (2002) 218.
- 8) 島順彦, 神之村俊, 北嶋弘一, 上田晃: DLC コーティング工具によるアルミ合金加工: 2002 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2002) 198.
- 9) 中山一雄, 小川誠: 切りくず形状から見たねじれ刃ドリルの切削性能, 精密機械, **43**, 4 (1977) 427.
- 10) 広田明彦, 笠原和夫: ドリル加工における切りくず生成状態と切削抵抗の解析的予測 (第 1 報), 精密機械, **47**, 8 (1981) 987. (第 2 報) **47**, 9 (1981) 1102.
- 11) 笠原和夫, 広田明彦: すくい面が平面からなるドリルの切削と長ピッチ形切りくず生成機構の解析, 精密工学会誌, **56**, 6 (1990) 1075.
- 12) 花崎伸作, 細井良祐, 細井俊明, 長町敏治, 長谷川嘉雄: 深穴を高効率でけるツイストドリルの切りくず排出機構, 日本機械学会論文集 (C 編), **65**, 631 (1999) 1229.