

回転振れのある小径ドリルの加工挙動 ドリル求心性に及ぼす切れ刃の向きの影響

佐藤崇弘^{*1}, 田中久隆^{*2}, 佐藤昌彦^{*2}, 小出隆夫^{*2}

Drilling behavior of run-out micro drill
Effect of cutting edge orientation on centripetal characteristics

Takahiro SATO, Hisataka TANAKA, Masahiko SATO and Takao KOIDE

小径ドリル加工における回転振れの発生は、工具径に対する回転振れの比が大きいため、加工挙動に大きな影響を及ぼす。回転振れのあるドリルは、被削面食い付き後に回転中心に収束していく場合があるが、ドリル先端形状の影響など不明な点が多い。そこで、本報告では回転振れのあるドリルの加工挙動について解析と実験から考察した。とくに、食い付き時における回転中心からみた切れ刃の向きが、加工挙動に及ぼす影響について調べた。その結果、加工中、ドリル先端中心がシャンク端面中心に対して回転方向の位相遅れが発生する場合、切れ刃の向きが時々刻々と変化することで被削材より受ける力が変化し、加工挙動に影響を及ぼすことがわかった。

Key words: micro drill, centripetal phenomenon, run-out, FEM, drilling behavior, cutting force

1. 緒言

電子機器に搭載されるプリント基板では、製品の多機能化・小型化に伴い、導通穴(スルーホール)の狭ピッチ化・小径化が進んでいる。また、自動車用の燃料噴射ノズルや化学分析機器用ノズルなど、各種ノズル製品でも低燃費や高精度分析の観点から穴の小径化が進んでいる。

このような小径化とともに、直径1mm以下の小径ドリル加工ではドリルの偏心などに起因する回転振れが無視できなくなっている。特に、小径ロングドリルによる微細深穴加工では、加工精度に及ぼす回転振れの影響が大きい。

そのような中、近年Watanabeらの研究¹⁾²⁾では、図1に示すように回転振れのあるドリルが食い付き時から徐々に回転中心に収束して行く現象、いわゆる求心現象を高速度カメラで2次元的に観察している。また、著者らの研究³⁾では、食い付き時におけるドリル先端の挙動を非接触変位センサで計測し、被削材材質とドリル先端の求心しやすさ(以下、求心性と呼ぶ)の関係について考察している。さらに、梶田らの研究⁴⁾では、ドリルの先端を円錐状の丸棒に置き換え、求心現象について数式モデルを提案し、実験によりその検証を行っている。この研究では、回転振れのあるドリルが被削面に食い付いた際、ドリル先端は被削材から横方向の抵抗を受けて、ドリル根元(シャンク端面)に対して位相遅れが発生すると述べられている。位相遅れの発生は、ドリルの弾性変形を意味しており、ド

リルには弾性回復力が発生し、これらの力の関係によりドリル先端が求心するとしている。この研究は、回転振れのあるドリルの求心現象について説明されている先駆的な研究である。しかし、求心時にドリル先端に作用する力の向きや大きさ、あるいはドリル先端形状を考慮した求心現象の解明には至っていない。

そこで本研究では、プリント基板の微細深穴加工の高精度化を目的に有限要素法を利用した切削シミュレーションソフトウェアを用いて、回転振れのあるドリルの被削面食い付き時の切削力とドリル先端移動軌跡を数値計算し、ドリル求心性に及ぼす食い付き時の切れ刃の向きの影響について調べた。また、加工実験により解析方法の妥当性を検証した。

2. 求心現象

回転振れのあるドリルで穴加工する場合、もしドリルが剛体であれば、図2(a)に示すようにドリル先端中心とシャンク端面中心は同じ軌跡を描く。これをドリル先端方向からみた場合、図2(b)に示すように主軸回転中心からみた切れ刃の向きは

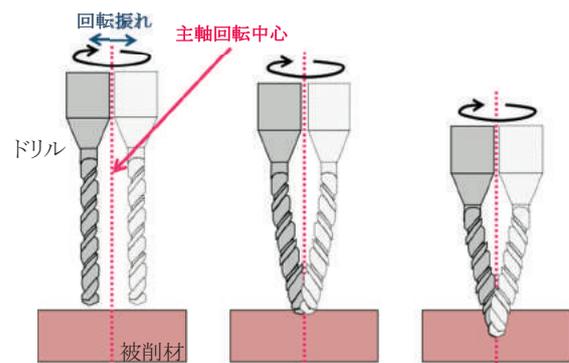


図1 求心現象

*1 (地独)鳥取県産業技術センター:〒689-3522 鳥取県米子市市下1247 Tottori Institute of Industrial Technology

*2 鳥取大学大学院:〒680-8500 鳥取県鳥取市湖山町南4-101 Tottori University

〈学会受付日:2014年1月23日〉

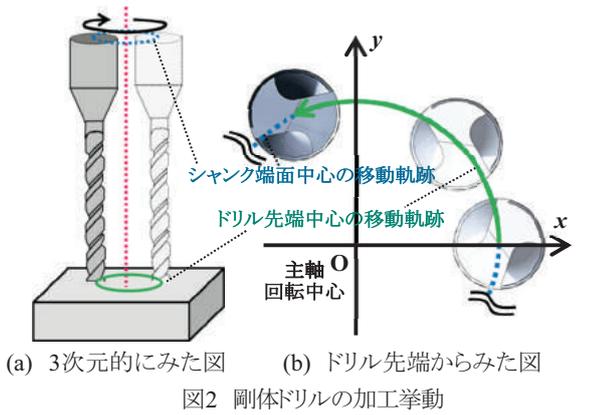


図2 剛体ドリルの加工挙動

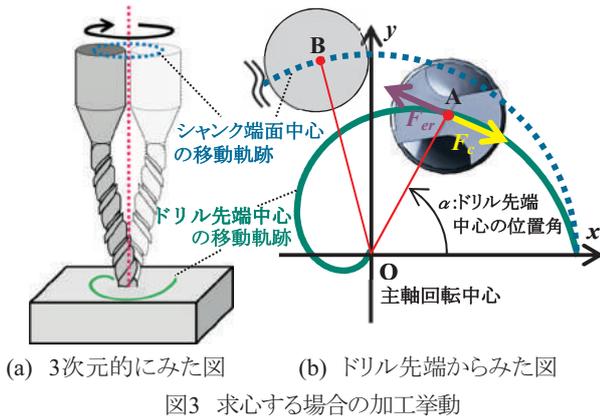


図3 求心する場合の加工挙動

常に同じである。しかし、実際のドリルは剛体ではなく変形するため、ドリル先端中心はシャング端面中心と同じ軌跡を描かず、図 3(a) に示すようにドリル先端が主軸回転中心に収束する場合がある。なお、図 3(b)はドリル先端からみた求心途中のある瞬間を表しており、緑色実線上の点 A がドリル先端中心、青色破線上の点 B がシャング端面中心、点 O が主軸回転中心を表している。

回転振れのあるドリルが被削材に接触した瞬間、ドリル先端と被削材の間でx-y面内に力が働く。その結果、図3に示すようにドリルが弾性変形するため、シャング側とドリル先端で回転方向に∠AOBだけ位相遅れが発生する。この場合、ドリル先端には、x-y面内において、回転中心から半径方向に働く工具の遠心力や被削材との間に発生する摩擦力を含んだx-y面内切削力Fcが働いている。また、ドリル全体をシャング中心にもどそうとする弾性回復力Feも作用しており、これとFcが釣り合っている。

ドリルは、先端が円錐の丸棒の場合と同様、x-y 面内において力を受けながら求心する。ただし、丸棒とドリルが同じ剛性であっても、実際のドリルではドリル先端形状の影響により力の向きが変化するため、移動軌跡が異なると考えられる。切れ刃の向きに着目すると、図 3(b)に示すように本来は点 B での切れ刃の向きが、位相遅れにより点 A でそのような切れ刃の向きになる。このように、切れ刃の向きは位相遅れにより時々刻々変化し、ドリル先端の移動軌跡に影響を及ぼすものと考えられる。この点については、5.2 節で考察する。

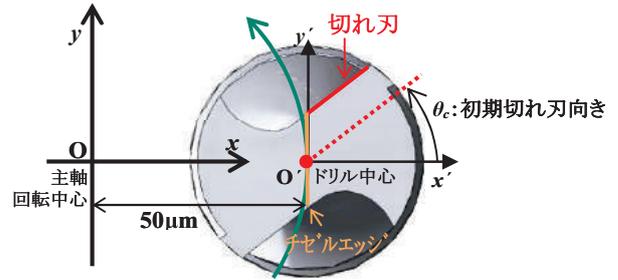


図4 ドリルの解析モデル(t=0)



図5 解析に用いたドリル

表 1 ドリルの諸元

長さ	溝長 0.7mm, 全長 3mm
形状	先端角 120°, 芯厚 0.05mm 逃げ角 12°, ねじれ角 30°
直径	φ0.15
材質	超硬

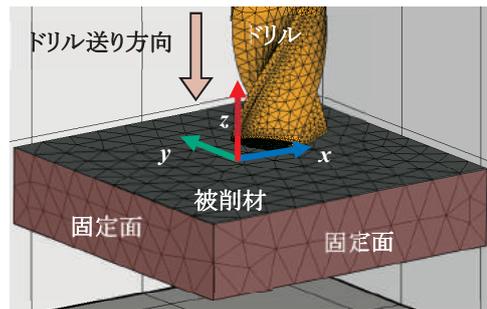


図6 工具と被削材の境界条件

3. 解析方法および実験方法

3.1 解析方法

切削加工は力学的な視点からみると、材料の弾塑性変形後、破壊により切りくずが生成される現象である。熱学的な視点からみると、材料の変形や工具・被削材間の摩擦によって発熱する現象である⁵⁾。そこで本研究では、ひずみ速度依存性と大変形を考慮した構造解析、ならびに切削熱や摩擦熱による材料軟化特性を考慮した熱伝導解析を同時に行うことができる切削シミュレーションソフトウェア⁶⁾を用いて、回転振れが発生したドリルで加工するときの切削力と、それによるドリルの曲げ変形およびねじり変形を計算し、ドリル先端のチゼルエッジ中心点の移動軌跡(以下、ドリル先端移動軌跡と呼ぶ)を求めた。

3.1.1 解析モデル

図4に、使用した解析モデルの主軸回転中心とドリルの位置関係を示す。なお、この図は解析開始時(t=0)の解析モデルを表している。図中、x-yは主軸回転中心にある座標系で、x'-y'はドリルに固定されてドリルとともに回転する座標系である。解析では、図に示すようにドリルの中心を主軸回転中心

表2 切削条件

被削材	純アルミ(A1100)
寸法	x 0.5mm, y 0.5mm, z 0.12mm
主軸回転速度	300,000min ⁻¹
送り量	0.02mm/rev
主軸回転角度	540°

表3 被削材とドリルの節点数

	ドリルの節点数	被削材の節点数
モデル1	10647	543
モデル2	49321	545
モデル3	10746	4014
モデル4	49359	4071



図7 特殊ドリル

表4 実験に用いたドリル諸元

材質	超微粒子超硬
直径	φ0.15
溝長	0.4mm
ボデー	2.5mm
芯厚	0.05mm

からx軸方向に50µm(TIR: Total Indicator Run-out表示では振れ量100µm)離れた点にしている。また、ドリルに固定されたx'軸と切れ刃のなす角(以下、初期切れ刃向きと呼ぶ)を θ_c とし、 $\theta_c=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ および 135° の4種類について解析を行った。

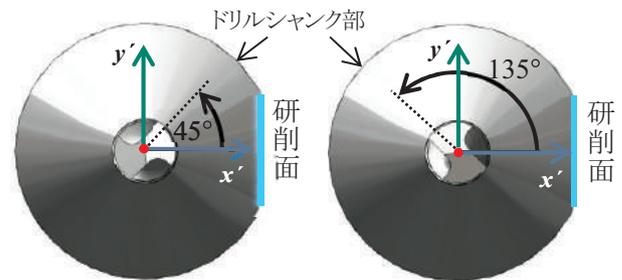
解析結果からドリル先端の移動軌跡をリサージュ図形で描くことで、求心性に及ぼす切れ刃の向きの影響を調べた。また、解析に使用したドリルは、図5に示すような溝長の比較的短いものとした。諸元を表1に示す。

ドリルと被削材の解析モデルを図6に示す。図に示すように被削材の側面のみ完全固定とし、他の面はフリーとした。

本研究では、プリント基板の食い付き時の加工精度向上を目的としている。そのため、表2に示すように被削材をエントリーシート(エントリシート)の材質である純アルミとし、切削条件を一般的なプリント基板の穴加工条件とした。

3.1.2 メッシュサイズについて

解析精度向上と解析時間短縮を目的に、ドリルと被削材が接触するドリル逃げ面と被削材加工点近傍のメッシュサイズを細かくし、それ以外のメッシュサイズを粗くした。なお、ドリル逃げ面のメッシュサイズは工具径の2%(3µm)とし、被削材の加工点近傍のメッシュサイズは工具径の3%(5µm)とした。また、被削材は切り屑生成によりリメッシュされるため、アダプティブ法⁷⁾によりメッシュサイズを細かくした。



(a) $\theta_c=45^\circ$ (b) $\theta_c=135^\circ$
図8 初期切れ刃向きとドリルシャンク部研削面の関係

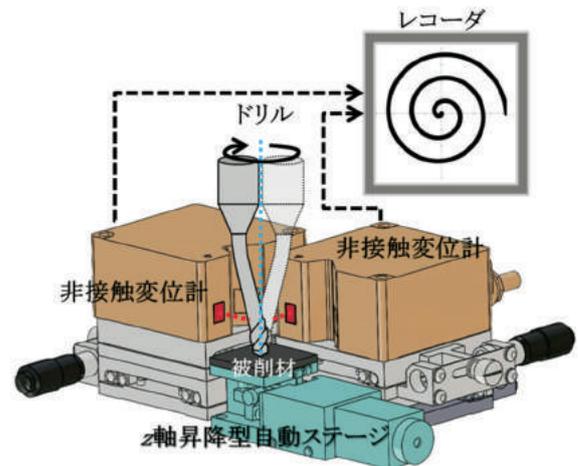


図9 ドリル先端移動軌跡の計測方法

ドリル逃げ面と被削材の加工点近傍以外のメッシュサイズを粗くすることで、解析結果の精度低下が懸念される。そこで、表3に示す4つの異なるメッシュサイズのモデルで解析を行い、切削力と移動軌跡に及ぼすメッシュサイズの影響を調べた。その結果、表3の4モデル間では解析結果にほとんど影響がなかったため、解析時間の短いモデル1(メッシュサイズはドリルで約10µm、被削材で約50µm)で数値計算を行った。

3.2 実験方法および実験装置

実験に使用したドリルは、図7に示すφ0.15のルーマ形ツイストドリルで、先端のみ溝のある特殊ドリルである。諸元を表4に示す。なお、実験での初期切れ刃向き θ_c の設定方法は、以下のとおりである。図8に示すように、まずドリルの切れ刃をx'軸に対して角 θ_c だけ回転させた状態でセットし、次にx'軸に垂直なドリルシャンク部円筒面を所定の量だけ平面研削する。研削した面を4つにスリ割されたコレットの1つの面に合わせてチャッキングすることで、初期切れ刃向き θ_c が設定されると同時に、主軸回転中心に対してドリル中心が図4のx軸方向に所定の量、オフセットされる。

移動軌跡は、マシニングセンタ(株安田工業 YBM640V)のテーブルx軸方向、y軸方向にそれぞれ取り付けられた非接触レーザー変位計により計測した。測定方法は、図9に示すように同期した2つの非接触レーザー変位計(株キーエンス センサ:LK-H020、アンプ:LK-G5000V)をセットし、ドリルの溝直上の円筒部を計測対象面とした。また、測定したデータからリサージュ図形を描くことで求心性を評価した。なお、ドリルをエアタービンスピンドル(大昭和精機株RSX7)により回転させた状態で主軸を固定し、z軸昇

降型自動ステージ上の被削材を上下方向に移動させて加工を行った。

ドリル先端の挙動を図 9 の方法で計測する場合、本研究で利用したセンサのサンプリング速度とスポット径、z 軸昇降型自動ステージの移動速度の関係で回転速度、送り量および回転振れに限界がある。そのため、切削条件は測定可能な回転振れ約 $3\mu\text{m}$ (TIR 表示では約 $6\mu\text{m}$)、主軸回転速度 20700min^{-1} 、送り量 $7.5\mu\text{m}/\text{rev}$ とした。なお、被削材は解析と同じ純アルミである。

4. 解析結果および実験による解析方法の検証

4.1 求心性に及ぼす初期切れ刃向きの影響(解析結果)

初期切れ刃向き θ_c が $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ および 135° の 4 種類のドリルで加工するときの切削力とドリル先端移動軌跡を数値計算で求めた。結果を図 10(a)~(d) に示す。なお、これらの図は主軸上方からみたもので、図中の $x=0, y=0$ の位置が主軸回転中心である。角 α は図 3(b) に示す x 軸と OA のなす角で、本論文ではドリル先端中心の位置角と呼ぶ。

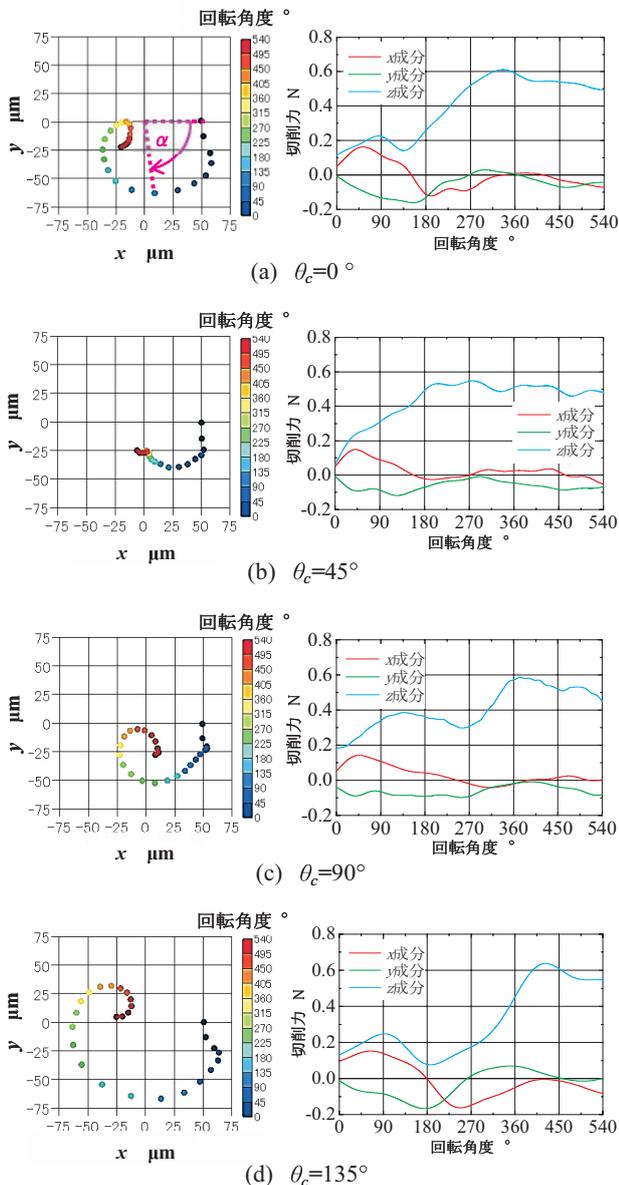


図 10 切削力と移動軌跡に及ぼす初期切れ刃向きの影響

位相遅れがない場合、図 2 に示したようにシャンク端面中心の回転角度とドリル先端中心の位置角は同じである。しかし、位相遅れがある場合はそうではなく、たとえば図 10(a) をみるとドリル先端中心の位置角 α が約 80° に対して、シャンク端面中心の回転角度(図中の●印の色)は約 135° であり、両者の角度が異なっていることがわかる。これは他の θ_c においても同様である。また、各 θ_c における移動軌跡を比較すると、 θ_c が $45^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 135^\circ$ の順で求心しやすい。この点については 5.2 節で考察する。

また、ドリル先端の求心とともに、切削力の x および y 成分の変動量が小さくなっているが、これは求心とともにドリルの弾性変形が小さくなり、弾性回復力が小さくなっていることを表している。一方、ドリル先端が求心するにつれて回転振れの少ない通常のドリル加工が行われるため、z 成分が大きくなったものと考えられる。

4.2 実験による解析方法の検証

3.2 節で述べたように、一般的なプリント基板の切削条件ではドリル先端の移動軌跡が測定できないため、測定可能な切削条件で実験を行った。 $\theta_c = 45^\circ$ の結果を図 11(a) に、 $\theta_c = 135^\circ$ の結果を図 11(b) に示す。なお、ドリルが被削面に接触したポイントを明確にするため、切削抵抗センサ(日本キスラー(株):9317B)を被削材とステージ間にセットし、スラストが発生し始めた点を測定してドリル先端接触点とした。図中、青色の部分が被削材上面を空転しているときの移動軌跡であり、赤色の部分が加工しているときのそれである。図より、 $\theta_c = 45^\circ$ では $\theta_c = 135^\circ$ より早く求心していることがわかる。

ここで解析方法の妥当性を検証するため、実験と全く同じ条件

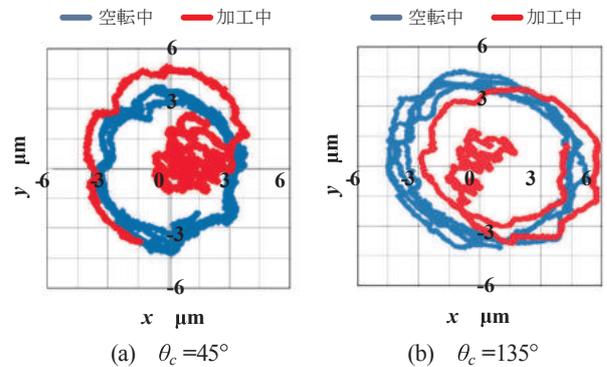


図 11 初期切れ刃向きと移動軌跡の関係(実験結果)

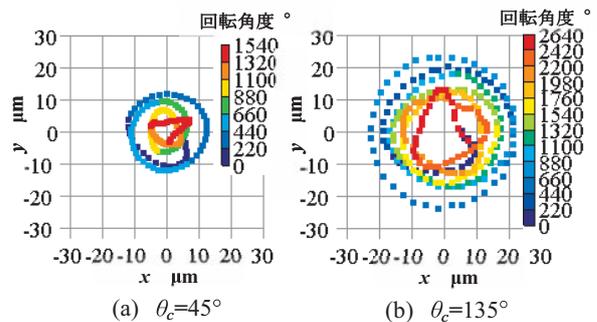


図 12 初期切れ刃向きと移動軌跡の関係(図 11 の実験と同じ条件での解析結果)

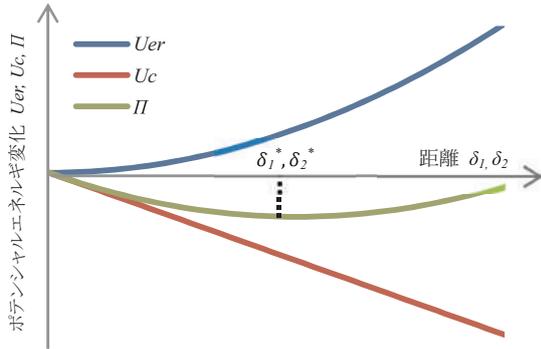


図13 ドリル加工中のポテンシャルエネルギー変化と移動距離の関係

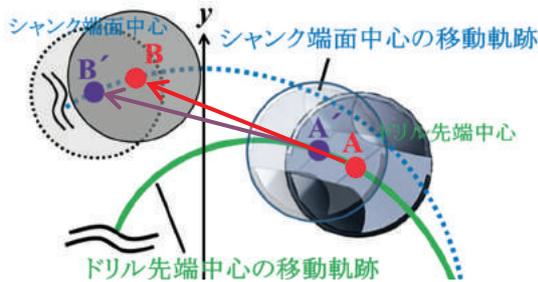


図14 ドリル加工中の微小時間変化

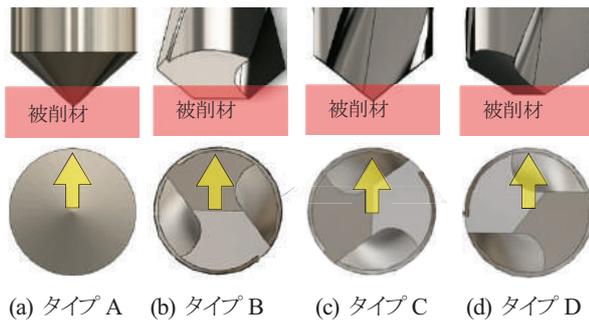


図15 工具先端形状と移動方向

で求心するまでのドリル先端の移動軌跡を数値計算した。θ_c=45°の結果を図12(a)に、θ_c=135°の結果を図12(b)に示す。図より、θ_c=45°では回転角度1500°付近で求心しており、θ_c=135°では回転角度2600°程度で求心している。図11と図12を比較すると、θ_c=135°に比べてθ_c=45°の方が求心しやすい点は定性的に同じといえ、本研究の解析モデルは、求心性の良否を判断する上で妥当と考えられる。

5. 求心性に関する考察

5.1 求心性に及ぼす工具先端形状の影響

図3で述べたように、ドリル先端は切削力と弾性回復力が釣り合いながら求心すると考えられ、切削力は外力として、弾性回復力は内力として作用している。被削面食い付き時に対するある瞬間のポテンシャルエネルギー変化を考えると、ドリルの弾性変形に起因するひずみによるエネルギー変化U_{er}(内部ポテンシャルエネルギー変化)は、x-y面内でのドリル先端中心とシャンク端面中心との距離の変化量δ₁の関数である。一方、切削力によるポテンシャルエネルギー変化U_c(外部ポ

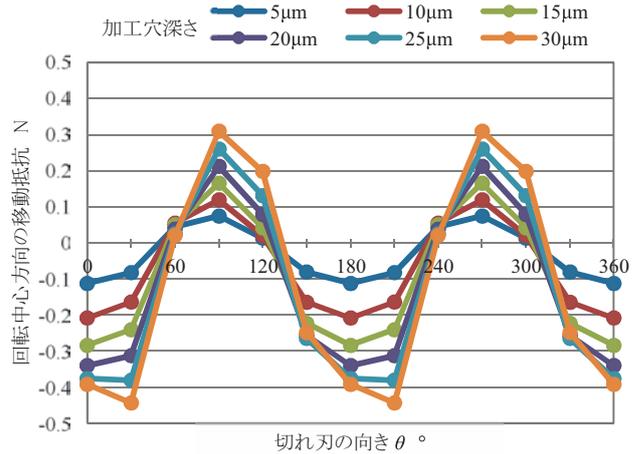


図16 移動抵抗に及ぼす切れ刃の向きの影響

テンシャルエネルギー変化)は、x-y面内でのドリル先端の移動距離δ₂の関数である。ここで、系全体の全ポテンシャルエネルギー変化Πは、

$$\Pi = U_{er}(\delta_1) + U_c(\delta_2) \tag{1}$$

で表され⁸⁾⁹⁾、図13に示すようにδ₁とδ₂により変化する。このような系では、Πが最小のとき、すなわちδ₁=δ₁^{*}、δ₂=δ₂^{*}のときが釣り合い状態であるとした、最小ポテンシャルエネルギー原理⁸⁾⁹⁾からドリル先端の移動方向と移動距離が決まる。

いま、図14に加工中のある瞬間(時刻t)のドリルを示す。ここで、点Aはドリル先端中心を、点Bはシャンク端面中心を表している。これらの2つの点は、時刻t + Δtではそれぞれ点A'、点B'に移動することになる。

なお、釣り合い状態となるδ₁^{*}とδ₂^{*}をベクトルで表すと次式で表される。

$$\vec{\delta}_1^* = \vec{A'B'} - \vec{AB} \tag{2}$$

$$\vec{\delta}_2^* = \vec{AA'} \tag{3}$$

U_{er}を決定する弾性回復力変化の向きはδ₁^{*}の向きそのものであるが、U_cを決定する切削力の向きはδ₂^{*}の向きではなく、ドリル先端形状により変化する。

いま、図15に示すタイプA、タイプB、タイプCおよびタイプDの4つの工具先端形状に対して、被削材を固定して工具を切り込んだ状態で黄色い矢印の方向に移動させる場合を考える。工具先端が方向性のない円錐形状をしている場合(図15(a))、どのような方向に移動しても同じ力を受ける。しかし、工具先端が通常のドリル形状の場合、チゼルエッジに対して直角方向に横移動させる図15(b)では、チゼルエッジと同じ方向に移動させる図15(c)に比べて被削材から受ける力が大きいことは容易に想像がつく。また、図15(d)のようにチゼルエッジが傾いている場合、ドリルを図の右側に移動させようとする力の成分が生じる。このように、横移動時にドリル先端が被削材から受ける力はチゼルエッジの向きによって異なり、これが求心性に影響を及ぼすものと考えられる。このようなドリル先端が受ける力を「移動抵抗」と定義する。

5.2 移動抵抗の主軸回転中心方向成分と求心性の関係

3.1.1 項で述べた解析モデルでは、切れ刃の向きが位相遅れにより時々刻々変化するため、一定の切れ刃の向きで移動抵抗を算出できない。そこで、図2で示した剛体ドリルを用い

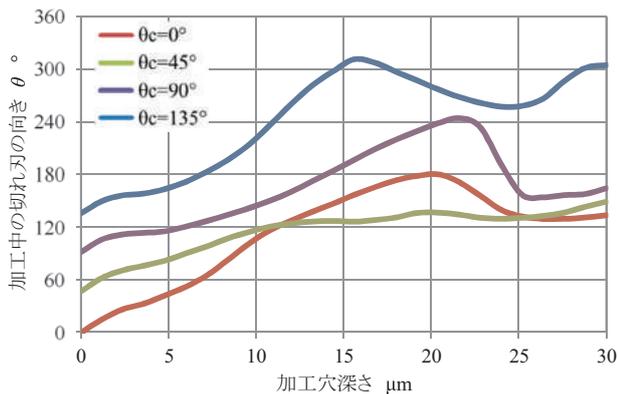


図 17 加工穴深さと加工中の切れ刃の向きとの関係

て解析を行い、得られた切削力を移動抵抗とした。

解析に用いたドリルは点対称形状であるため、初期切れ刃向き θ_c は $0^\circ \sim 150^\circ$ まで 30° 間隔で 6 種類とした。その他の境界条件などは、3.1 節と同じである。なお、初期切れ刃向き θ_c と区別するため、主軸回転中心からみた加工中の切れ刃向きを θ とし解析を行った。 θ は、図 3(b)において直線 OA と切れ刃のなす角である。加工中の切れ刃の向きと移動抵抗の主軸回転中心方向成分の関係を図 16 に示す。なお、移動抵抗の主軸回転中心方向成分の正負は主軸回転中心方向を正、逆方向を負とし、移動抵抗は穴深さ $30\mu\text{m}$ までを $-z$ 方向に $5\mu\text{m}$ 間隔で 6 種類算出した。

この図から、移動抵抗は θ が $60^\circ \sim 120^\circ$, $240^\circ \sim 300^\circ$ で主軸回転中心方向に働き、 $330^\circ \sim 30^\circ$, $150^\circ \sim 210^\circ$ で主軸回転中心方向と逆向きに働いている。また、穴深さの増加により、移動抵抗が増加している。これは、ドリルが横移動する際にドリル側面部と被削材の接触面積が増大することで移動抵抗が増大したものと考えられる。

図 10 に示した数値計算の結果では、加工直後から位相遅れにより切れ刃の向きが時々刻々変化している。そこで、図 10 から各穴深さにおける θ を求めた。結果を図 17 に示す。なお、 θ の初期値は、それぞれ $\theta_c = 0^\circ$, 45° , 90° および 135° である。

図より、 $\theta_c = 45^\circ$ では、 θ は主軸回転中心方向に力が発生する $60^\circ \sim 120^\circ$ を安定して向いているのに対し、それ以外の θ_c では、必ずしも $60^\circ \sim 120^\circ$ 方向を向いていないことがわかる。

このことが、 $\theta_c = 45^\circ$ が求心しやすく、その他の θ_c が求心しにくい(図 10)理由と考えられる。

6. 結言

本研究では、回転振れのあるドリルを用いて、被削面食い付き直後からの切削力とドリル先端移動軌跡を数値計算し、切れ刃の向きと求心性の関係について解析と実験から考察した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 回転振れのあるドリルで加工するとき、ドリル先端が主軸回転中心方向に求心して行く場合があることを解析で示した。
- (2) ドリル先端が求心するとき、ドリル先端中心とシャンク端面中心に回転方向の位相遅れが発生していることを解析で明らかにした。
- (3) 本研究で解析対象とした小径ドリルでは、初期切れ刃向き 45° が求心しやすく、 135° が求心しにくいことが、解析と実験から明らかになった。
- (4) ドリルの切れ刃・チゼルエッジの向きを考慮した切削力解析を行い、移動抵抗の主軸回転中心方向成分の正負によって求心性の良否が判断できることを示した。

謝辞

本研究で使用したドリルは、ユニオンツール(株)より提供いただいた。また、切削シミュレーションソフト(AdvantEdge)のメーカーである伊藤忠テクノソリューションズ(株)より様々な協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

7. 参考文献

- 1) H. Watanabe, H. Tsuzaka, M. Masuda: Micro drilling for printed circuit boards(PCBs), J. Precis. Eng., 32, 10(2008)329.
- 2) H. Watanabe, H. Tsuzaka, M. Masuda: Micro drilling for printed circuit boards(PCBs) : Influence of Radial Run-out on Characteristics of Micro Drilling, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 74, 11(2008)1204(in Japanese).
- 3) T. Sato, H. Tanaka, M. Sato, T. Koide, Y. Nakajima, K. Kawamoto, Y. Omura, T. Yamamoto: Study on Micro Drilling for Printed Circuit Boards : Improvement of Position Error of Hole Center and Hole Wall Roughness by Resin Painted Entry Sheet, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 79, 12(2013)1229(in Japanese).
- 4) M. Masuda, S. Kimoto, O. Horiuchi, T. Shibata, Y. Murakami: Influence of Drilling Run-out on Position Accuracy of Holes in Micro-drilling, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 79, 5(2013)449(in Japanese).
- 5) 小野浩二, 河村末久, 北野昌則, 島宗勉: 理論切削工学, 現代工学社, (2003)6.
- 6) Y. Ohnishi: Finite Element Analysis Software of Cutting, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 76, 8 (2010) 857(in Japanese).
- 7) 岸正彦: 構造解析のための有限要素法実践ハンドブック, 森北出版, (2006)210.
- 8) 吉田総仁: 弾性力学の基礎, 共立出版, (1997)83.
- 9) 崎本達郎: 構造力学, 森北出版, (2012)44.