

## ◇ 特集 切削現象の可視化技術 ◇

小径ドリルにおける加工挙動評価とその解析  
Evaluation of drilling behavior in micro drill and their analysis佐藤崇弘\*  
Takahiro SATO

Key words: micro drill, printed circuit boards, entry sheet, centripetal phenomenon, run-out, drilling temperature

## 1. 緒言

近年、スマートフォンやタブレット端末などの普及に伴い、その周辺機器の電化製品も合わせて多機能化・小型化が進んでいる。これら電子機器の内部には、プリント配線板が内蔵されており、電子部品の立体配線が可能のようにスルーホールがドリルやレーザによりあけられている。プリント配線板は、銅箔、ガラス繊維、樹脂による複合材料であるため、ドリル加工時に切りくず排出不良が発生しやすい。さらに、直径  $50\mu\text{m}$  ~  $500\mu\text{m}$ ,  $L/D=10$  以上 ( $L$ : 穴深さ,  $D$ : 穴径) の小径深穴を高速で加工する技術が必要とされる。

一方、自動車用燃料噴射ノズルや化学分析装置の金属製ノズル部品においても、燃費改善や分析精度向上を目的に穴の高品位化が求められている。しかし、小径ドリル加工は、微小領域における加工現象であるため、評価が非常に難しい。また、工具径に対する回転振れの比が大きくなるため、突発的な工具折損や加工精度の悪化などの課題がある。

そこで、本稿では筆者がプリント配線板を対象にした小径ドリル加工における加工挙動を実験により評価した事例<sup>1)</sup>と回転振れのある小径ドリルの加工挙動を実験とシミュレーションにより評価した事例<sup>2)</sup>を紹介する。

## 2. プリント配線板の穴加工

## 2.1 プリント配線板の穴加工手法

プリント配線板の穴加工は、一般的に専用加工機で行われており、金属加工用の機械とは異なる。具体的には、**図1**に示すように被削材であるプリント配線板を複数枚重ねた後、

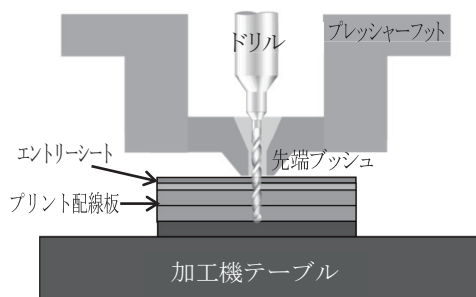


図1 プリント配線板の穴加工時のセッティング状態

その上面にエントリーシート(以下、E/S)と呼ばれる食い付き性向上を目的にした補助材をセットする。これらの浮きを抑えるため、加工機にはプレッシャーフットと呼ばれる機構により被削材を上から下方向に抑えながらドリル加工し、加工中は先端プッシュの穴から切り屑を吸引する構造となっている。

なお、E/Sは、アルミニウム合金製のシートであり、板厚  $0.07\text{mm}$  ~  $0.3\text{mm}$  程度の製品が使用されている。近年では、より高品質な穴加工を行うため、アルミニウム板の上面に樹脂を塗布したもの(以下、樹脂付きE/S)が普及している。潤滑や冷却の機能を持たせた樹脂は、アルミニウムの切りくずとともにドリルに巻き付き潤滑油と同様の効果を発揮すると考えられている。このE/Sにより、プリント配線板の穴加工に求められる穴位置精度、穴壁面粗さを改善することができる。

## 2.2 プリント配線板の切りくず排出状況観察

プリント配線板は、主に銅箔、ガラスクロス、樹脂が層状に構成されている。**図2**に穴加工後、銅めっきした穴断面を示す。図より、穴壁面の樹脂層部分が主にえぐられることがわかる。その要因を調べるため、**図3**に示すようにプリント配

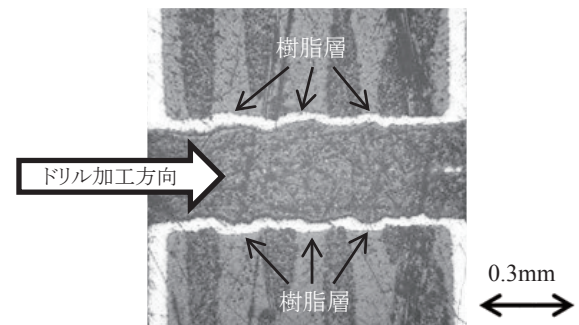


図2 プリント配線板の穴壁面悪化事例

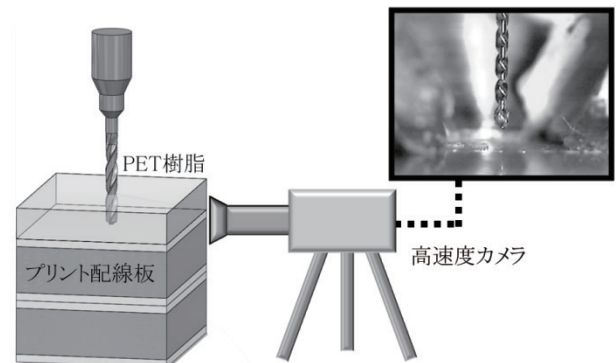


図3 切りくず排出状況観察手法

\* 地方独立行政法人鳥取県産業技術センター: 〒689-3522 鳥取県米子市日下1247

(学会受付日: 2016年 月 日)

線板の最上面に無色透明な PET シートを敷き、切りくずが穴内部から排出される状況を PET 樹脂側面から高速度カメラで撮影した。

被削材は、エッチングにより銅箔を除去したプリント配線板と通常の銅箔付きのプリント配線板の 2 種類を用いて、回転数  $300 \times 10^3 \text{min}^{-1}$ 、送り量  $7.5 \mu\text{m}$  で加工を行った。試験結果を図 4 に示す。図より、銅箔なしを加工した場合、切りくずつまりが発生しているものの穴壁面への影響は小さいが、銅箔ありを加工した場合穴壁面を荒らしている様子がわかる。これは切削温度が上昇した銅箔切りくずが穴壁面を荒らしていると推測される。

銅箔ありと銅箔なしの 2 種類の被削材を加工する際のトルクを比較測定した。結果を図 5 に示す。なお、実験に用いたドリルは図内に示す摩耗したドリルである。図より、銅箔なしの場合、トルクは穴の深さとともに徐々に増大していることがわかる。一方、銅箔ありの場合、銅箔なしではみられなかった大きな変動が加工後半(穴底面付近)で発生した。これは、底面にある銅箔の切りくずが排出されずに詰まったため、このように大きなトルクとなったと考えられる。

2.3 プリント配線板穴加工時の切削温度測定

プリント配線板の穴壁面は、図 2 に示すようにガラス転移点が  $200^\circ\text{C}$  程度である樹脂部においてえぐれが発生する場合がある。そこで、2 種類の樹脂付き E/S とアルミニウム製 E/S を使って穴加工した場合の穴壁面凹凸をレーザ顕微鏡により測定した。結果を図 6 に示す。なお、図は左側から右側方向に向かって穴をあけた穴壁面の凹凸を測定しており、良好な穴壁面はドリル進行方向に向かって濃淡図のムラは少ないが、悪化した穴壁面は濃淡ムラが出る。また、樹脂付き E/S は、吸熱量の多い PEG 系樹脂付き E/S と PEG 系に比べて吸熱量

の劣る wax 系樹脂付き E/S の 2 種類を用いた。図より、吸熱量の多い PEG 系樹脂付き E/S が最も良好であり、そして wax 系樹脂付き E/S、アルミニウム製 E/S の順番で悪くなっていることがわかる。この要因を調べるため、穴貫通時の刃先温度測定を行った。測定は、図 7 に示すようにドリル貫通箇所底面から上面に向けてコア径  $\phi 0.2$  の光ファイバーをセットし、穴貫通直後のドリル先端から発せられる赤外線を受光して、InAs/InSb 複合 2 色素子に伝送することにより行った。なお、2 色素子センサは、ドリルに接触式熱電対をセットし、炉の中で温度上昇させた場合の電圧値と熱電対の温度の関係により校正を行った。

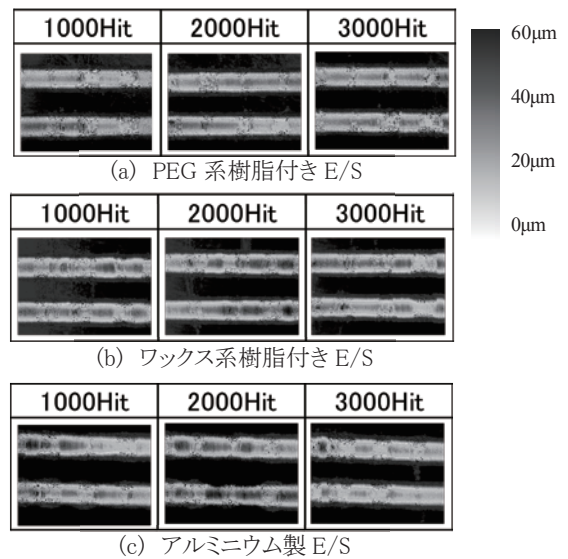


図 6 E/S の樹脂特性と穴壁面粗さの関係<sup>1)</sup>

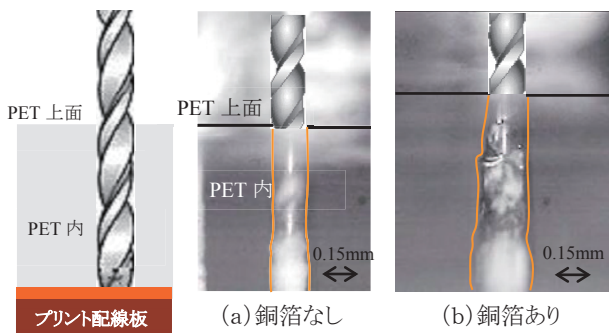


図 4 切りくず排出状況

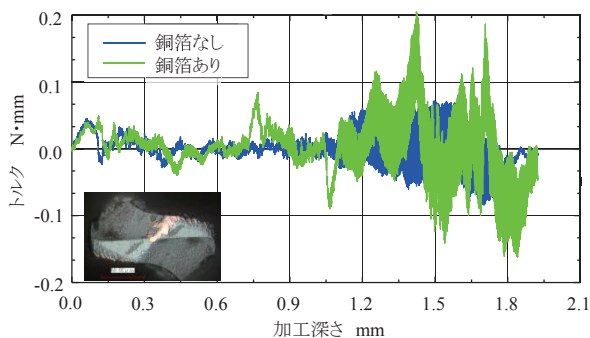


図 5 トルクに及ぼす銅箔の影響

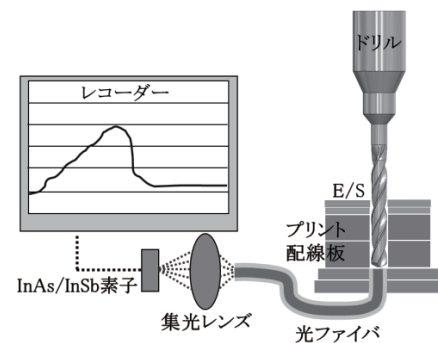


図 7 切削温度測定方法

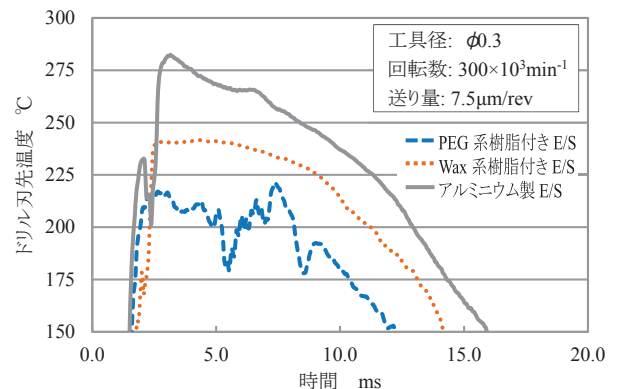


図 8 ドリル刃先温度に及ぼす E/S の樹脂特性の影響<sup>1)</sup>

貫通後のドリル刃先温度を測定した結果を図 8 に示す。図より、穴壁面粗さの関係と同様に PEG 系樹脂付き E/S が最も温度が低く樹脂のついていないアルミニウム製 E/S が最も温度が高いことがわかる。

### 3. 回転振れのある小径ドリル

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の影響が無視できない。特に小径ロングドリルによる穴加工は、加工精度、工具折損に及ぼす回転振れの影響は大きい。そのような中、渡邊らの研究<sup>3)</sup>では、図 9 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いく現象、いわゆる求心現象を高速カメラにて観察している。さらに、榎田らの研究<sup>4)</sup>では、ドリル先端を円錐状の丸棒に置き換えて求心現象について数式モデルを提案し、実験により求心現象の検証を行っている。

本章では、有限要素法を利用した切削加工専用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被削材材料の影響を解析により調べ、実験によりその信憑性を確認した事例<sup>2)</sup>を紹介する。

#### 3.1 求心現象

回転振れのある剛体ドリルで加工する場合、加工中におけるドリル先端の移動軌跡は、シャンク端面中心の移動軌跡とドリル先端中心は同じ軌跡を描く。しかし、実際のドリルは弾性体であるため、シャンク端面中心とドリル先端中心は異なる軌跡を描き、図 10 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、実線上の点 A がドリル先端中心、破線上の点 B がシャンク端面中心、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  $x$ - $y$  平面内において摩擦力と遠心力を含んだ力  $F_c$  が働く。その結果、ドリルが弾性変形するため、わたみをシャンク中心にもどそうとする弾性回復力  $F_{er}$  が働き、 $F_c$  と  $F_{er}$  は常に釣り合いながら求心する。

#### 3.2 解析方法および実験方法

##### 3.2.1 解析方法および解析モデル

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

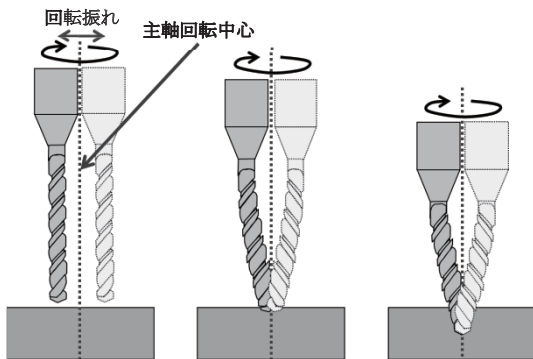


図9 求心現象

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<sup>5)</sup>を用いて、回転振れが発生したドリルの曲げ変形、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。

図 11 に、解析モデルとその境界条件を示す。解析では、図に示すようにドリルの中心を主軸回転中心から  $x$  軸方向に  $50\mu\text{m}$ (TIR: Total Indicator Run-out 表示では振れ量  $100\mu\text{m}$ ) 離れた点にしている。解析結果から、ドリル先端移動軌跡をリサージュ図形で描くことで、求心性に及ぼす被削材の影響を調べた。また、解析に使用したドリルは、実験条件と合わせるため、溝長の比較的短いものとした。諸元を表 1 に示す。境界条件は、被削材の側面のみ完全固定とし、その他の面はフリーとした。

##### 3.2.2 実験方法および実験装置

実験に使用したドリルは、図 12 に示す  $\phi 0.15$  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。なお、ドリルシャンク部円筒面を所定の量だけ平面研磨することで回転振れを発生させた。

移動軌跡は、マシニングセンタのテーブル  $x$  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 13 に示すように同期した 2 つの非接触レーザー変位

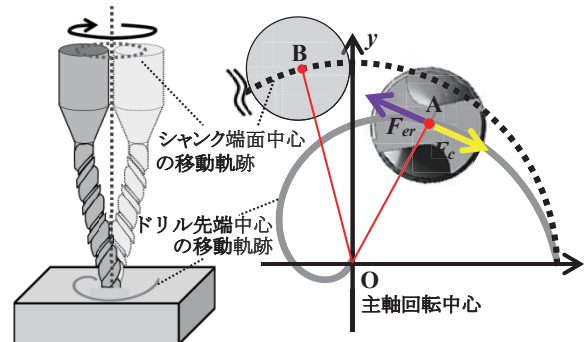


図 10 求心する場合のドリル先端加工挙動

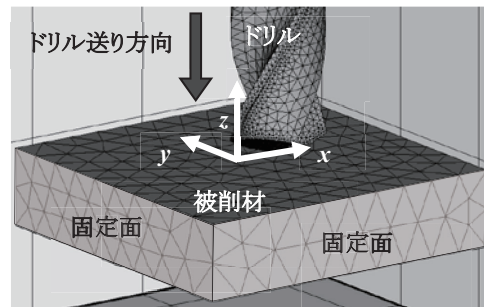


図 11 工具と被削材の境界条件

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	$\phi 0.15$
材質	超硬



図 12 特殊ドリル

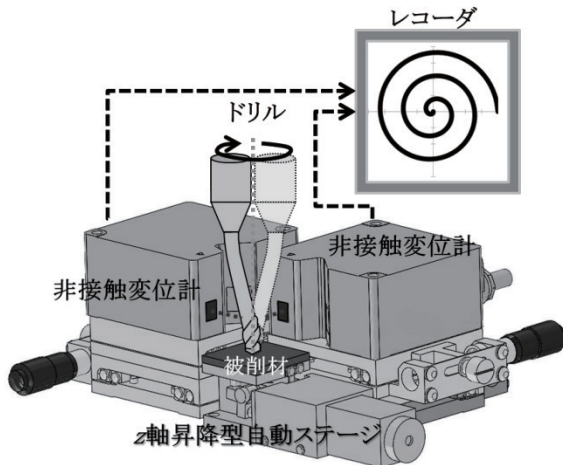


図 13 ドリル先端移動軌跡の計測方法

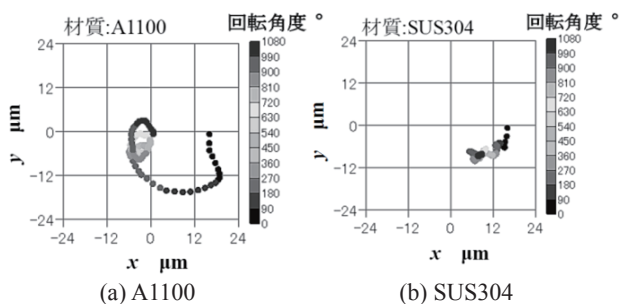


図 14 ドリル先端移動軌跡と被削材の関係(解析結果)

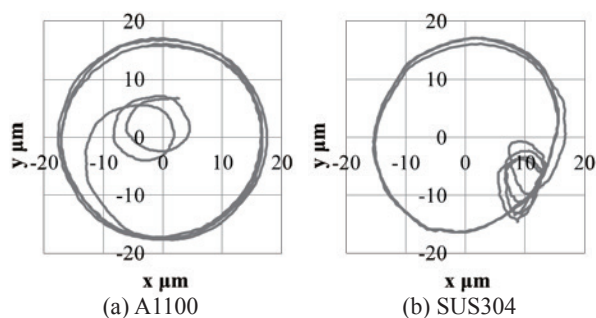


図 15 ドリル先端移動軌跡と被削材の関係(実験結果)

計をセットし、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チ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により回転させた状態でマシニングセンタの各軸を固定し、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 13 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  $16\mu\text{m}$  (TIR 表示では約  $32\mu\text{m}$ )、主軸回転速度  $20,700\text{min}^{-1}$ 、送り量  $7.5\mu\text{m/rev}$  とした。

### 3. 3 解析結果および実験による妥当性検証

#### 3. 3. 1 求心性に及ぼす被削材材質の影響

A1100 を加工するときのドリル先端移動軌跡の数値計算結果を図 14(a)に、SUS304 を加工するときのそれを図 14(b)に示す。図より A1100 を加工するときには、ドリル先端が被削材表面を歩行現象により回転中心に求心していることがわかる。SUS304 を加工するときには、A1100 と比べて歩行現象が少なく求心する前に位置決めされている。これは、A1100 が SUS304 と比較して比切削抵抗が小さいため、 $x$ - $y$  平面内で引きずられやすいが、SUS304 は比切削抵抗が大きいため引きずられにくく、求心性に影響を及ぼしたと考えられる。

#### 3. 3. 2 実験による解析方法の妥当性検証

実験により計測したドリル先端移動軌跡を図 15(a)に A1100 の結果を、図 15(b)に SUS304 の結果を示す。図より、被削材が A1100 の場合、ほぼ主軸回転中心に位置決めされているのに対し、SUS304 の場合は回転中心から少し外れた箇所位置決めされていることがわかる。これらの結果は、図 14 と比較して酷似しており、解析結果が妥当であることがわかる。

## 4. 結言

本稿では、小径ドリル加工中における切りくず排出中の穴内部観察、切削トルク測定、切削温度測定、回転振れのあるドリル先端加工挙動のシミュレーションと実験など主に動的現象評価手法を中心に紹介した。今後も小径穴のニーズは、さらなる小径化、深穴化、高品質化が求められている。しかし、微細加工現象を評価するには、高額な設備や時間を要する。そこで、近年普及が進んでいるシミュレーションソフトをうまく活用することで見えない現象を可視化し、短期間で技術開発を行うことができるのではと考える。

本内容は、鳥取大学、そして鳥取県内の中小企業と共同で研究を行った成果であり、今後の小径ドリル加工の一助となれば幸いである。

## 5. 参考文献

- 1) 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).
- 2) T. Sato, H. Tanaka, M. Sato, T. Koide: Drilling behavior of run-out micro drill : Effect of cutting edge orientation on centripetal characteristics, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 58, 7(2014)451(in Japanese).
- 3) 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).
- 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) Y. Ohnishi: Finite Element Analysis Software of Cutting, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 76, 8 (2010) 857(in Japanese).