プリント配線板の微小径穴あけ加工におけるドリル回転数および工具摩耗が
切りくず排出性におよぼす影響吉村 博仁^{*1}, 片平 雄^{*2}, 渡邊 英人^{*3}, 山下 泰樹^{*4}Study on effect of drilling rotational speed and tool wear on chip evacuation
of micro drilling of printed circuit boardHiromi YOSHIMURA^{*1}, Yu KATAHIRA^{*2}, Hidehito WATANABE^{*3} and Taiju YAMASHITA^{*4}^{*1, *4} Niigata University

8050 Ikarashi2-cho, Nishi-ku, Niigata-shi, Niigata 950-2181, Japan

^{*2} TOSHIBA Machine CO., LTD.

2068-3 Ooka, Numazu-shi, Shizuoka 410-8510, Japan

^{*3} UNION TOOL CO.

2706-6 Togawa, Settaya-machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-1104, Japan

Received 23 August 2015

Abstract

In recent years, needs for micro drilling are increasing, accompanying the development of higher wiring density of printed circuit board (PCB). When drilling PCB for the purpose of making the electric through holes, it has been said that the drill breakage is caused by being filled the chips of GFRP and copper of PCB in the drill flutes. Series of drilling tests of PCB have been carried out to investigate the shape of chips produced and the chips evacuation behavior out of drilling hole of the drill at the rotational speed of from $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ to $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$. The chips evacuation behavior out of drilling hole of the drill is filmed by a high-speed motion camera and the shape of chips produced is observed by a microscope. The chips of GFRP are short and small pieces with an increase in the drilling rotational speed. The evacuation out of drilling hole of the drill is very well and both of maximum cutting torque and average cutting torque are decreasing with an increase in the drilling rotational speed. When drilled at rotational speed of $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$, the chips of GFRP are long and large pieces, on the other hand, the chips of copper are short pieces, and chips evacuation out of drilling hole of the drill is almost not worse with an increase in the tool wear.

Key words : Printed circuit board, GFRP, Micro drilling, Chip evacuation, Shape of chip, Cutting torque

1. 緒 言

パソコンや携帯電話に代表される電子機器の多くはプリント配線板 (Printed circuit board : 以下 PCB) が内蔵されており, スルーホールと呼ばれる微小径の導通穴を用いて基板の上下で立体回路が形成されている. 近年の電子機器の軽薄短小化や高性能化に伴い PCB 配線パターンも高密度化し, スルーホールも小径化かつ狭ピッチ化の傾向にある. PCB は導電層である銅箔層および絶縁層であるガラス繊維強化プラスチック (Glass fiber reinforced plastic : 以下 GFRP) から構成される複合材料であるため, PCB のスルーホール穴あけは被削材としての銅箔層および GFRP 層が同一切れ刃を用いて同時に切削される異材質加工である. さらには生産効率の向上を目的に PCB を複数枚重ね合わせて穴あけ加工される小径深穴加工のため, 切りくず詰まりによってドリルが破損することが多く, 切りくず排出性向上が重要な課題である. ドリル直径が通常寸法で被削材が金属材料の穴あけ加工で

No. 15-00463 [DOI: 10.1299/transjsme.15-00463], J-STAGE Advance Publication date : 26 January, 2016

^{*1} 正員, 新潟大学 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

^{*2} 東芝機械(株) (〒410-8510 静岡県沼津市大岡 2068-3)

^{*3} 正員, ユニオンツール (株) (〒940-1104 新潟県長岡市摂田屋町字外川 2706-6)

^{*4} 新潟大学

E-mail of corresponding author: yoshimura@mot.niigata-u.ac.jp

は、切りくず形状や切りくず排出に関する解析的あるいは実験的研究が数多くなされている (Mellinger et al., 2003, 中山, 小川, 1985). ドリル直径が小径の金属材料あけ加工においては、切りくず詰まりがドリル折損の主要原因であること、およびステップフィードにより切りくずを分断させることが切りくず排出において効果があることが報告されている (Heineman et al., 2006).

一方、PCB の小径穴あけ加工においては、穴あけ深さが深くなると切りくず詰まりが発生し切削トルクが増大することでドリル折損に至ることが報告されている (大幸他, 1994, 岩田他, 1982, 大久保他, 1985, 小野他, 1992, Subramanian and Cook, 1977, 渡邊他, 2009). PCB の小径穴あけに対しては切りくず詰まりがドリル折損に大きな影響を与えているにもかかわらず、切りくず排出性や切りくず形状といった切りくずそのものに関する研究はほとんど見当たらない. これは PCB の小径穴あけ加工の際に排出される切りくずの大きさは極めて小さく、切りくず採取や観察が非常に困難であることが理由のひとつであると考えられる.

本研究では、直径 0.25mm の超硬ドリルを用いて PCB のスルーホール穴あけ加工をおこない、切削条件および工具摩耗が切りくず排出性や切りくず形状におよぼす影響を検討し、切りくず詰まりが生じる切削機構を明らかにする. 具体的には、4 枚重ねの PCB を用いて、ドリル送り量を 0.02mm/rev 一定としドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{min}^{-1}$ から $160 \times 10^3 \text{min}^{-1}$ の範囲で穴あけ加工実験を行い、切りくず排出状況は高速度カメラを用いて撮影し、排出された切りくず形状は顕微鏡を用いて観察する. さらに、穴あけ加工中の切削トルクを測定し、切りくず排出性や切りくず形状との関係を検討する.

2. 実験方法と実験条件

表 1 は実験に用いる被削材である PCB の主な仕様を示す. 図 1 は PCB 1 枚の断面模式図を示している. GFRP 層の上下には厚さ 12 μm の銅箔層をそれぞれ積層させており、PCB の 1 枚あたりの板厚は 0.8mm である. 実験には低熱膨張・難燃化や弾性率の向上を目的として、シリカ (SiO_2) や水酸化アルミニウム ($\text{Al}(\text{OH})_3$) などの無機フィラーが 30vol% 以上充てんされている PCB (三菱ガス化学㈱: CCL-HL832HS) を用いる.

Table 1 Specification of PCB

Material	Glass cloth and resin base copper-clad Laminate [Mitsubishi: CCL-HL832HS]
Copper layer	Thickness: 0.012mm/layer
Height	t0.8mm/panel

Fig. 1 Schematic illustration of cross section of PCB

図 2 は穴あけ加工実験装置の模式図を示す. 穴あけ加工実験には最高回転数 $160 \times 10^3 \text{min}^{-1}$ の AC モータ駆動エアベアリングスピンドルを搭載した汎用 PCB 用 NC 穴あけ加工機 (日立ビアメカニクス社: ND-1V212) を用いる. 実験機のテーブル上にバックアップボードを載せ、その上に PCB を 4 枚重ね合わせて固定し、穴あけ実験をおこなう. バックアップボードの材質はベークライトを用いる. プレッシャーフットは穴あけ加工機のスピンドル固定側に取り付けられている. プレッシャーフットの先端にはブッシュが取り付けられ、被削材である 4 枚重ねの PCB およびバックアップボードを押さえ付け、穴あけ加工中の浮き上がりを防止している. 切削トルクを測定する場合はプレッシャーフットのブッシュで押さえつけた場合と同様の浮き上がり防止効果を得るために、4 枚重ねの PCB およびバックアップボードは圧電型動力計に 4 カ所ボルト締めされている. このため、プレッシャーフットの有無が切削トルク測定におよぼす影響は無視できると考える.

プレッシャーフットとバキュームホースとの間に市販の掃除機用集塵フィルタを挿み込み、穴あけ加工後の切りくずを採取する. PCB 切りくずは、ひとつの切削条件ごとに 20 穴分を採取し GFRP 切りくずおよび銅箔切りくずに分類する. それぞれの切りくずは、切りくず形状観察や切りくず長さ測定を顕微鏡 (デジタルマイクロスコプ, KEYENCE 社, VHX-900) を用いて行う. PCB 穴あけ加工は、4 枚重ねの PCB を穴あけ完了するまでの

過程および穴あけ完了後に加工穴から戻す過程の2つに大きく分けられる。前者を穴あけ過程、後者を戻し過程と呼び、穴あけ過程と戻し過程を合わせて穴あけ加工1サイクルと呼ぶ。穴あけ過程における穴入り口部から排出される切りくず、および戻し過程におけるドリルに付着した切りくずやドリルから脱落する切りくずは、高速度カメラ（ナックイメージテクノロジー社、MEMRECAM fx-K4）を用いて観察する。

図3に示すように、穴あけ加工1サイクル中の切削トルクは圧電型動力計（Kistler社：9329A）を用いて測定される。動力計の切削トルク信号は、ローパスフィルタ（カットオフ周波数 $f_c=1.0\text{kHz}$ ）を介し、切削トルク測定において電気的および機械的ノイズと考えられる高周波成分を除去している。

高速度カメラ撮影および切削トルク測定の際は、切りくず吸引装置は作動せずに穴あけ加工される。切りくず吸引装置は、加工穴外部へ排出されてPCB基板上に堆積した切りくずを除去するのが目的であり、切りくず吸引装置の作動の有無が切りくず排出性や切削トルク測定におよぼす影響はないことが確認されている。このため、切りくず吸引装置の有無が高速度カメラを用いた切りくず排出状況観察および切削トルク測定におよぼす影響は無視できると考える。

図4はGFRP切りくず1個の切りくず長さの測定方法を示す。切りくずの端と端とを結ぶ直線が切りくず上を通過する場合（図4（a））、および切りくずの端と端とを結ぶ直線が切りくず上から外れる場合（図4（b））に分けられる。前者の場合は端と端とを結ぶ直線距離を用いて1個の切りくず長さ $l(\text{GF})$ を算出する。後者の場合は、切りくずの曲がった部位で分割しそれぞれの直線距離 $l_1(\text{GF})$, $l_2(\text{GF})$, $\dots$, $l_n(\text{GF})$ を足し合わせて切りくず1個の切りくず長さ $l(\text{GF})=l_1(\text{GF})+l_2(\text{GF})+\dots+l_n(\text{GF})$ を算出する。次に、切削条件ごとに採取された20穴分の切りくずの中から切りくず長さが長い方から5個の切りくずを選択し、それらの算術平均値を求め、その値を切削条件における切りくず長さ $l_m(\text{GF})$ と定義する。図5は銅箔切りくず1個の切りくず長さの測定方法を示す。銅箔切りくずについてもGFRP切りくずと同様に切りくず1個の切りくず長さ $l(\text{Cu})$ を算出し、それぞれの切削条件における切りくず長さ $l_m(\text{Cu})$ が定義される。

Fig. 2 Experimental setup of micro drilling test

Fig. 3 Experimental setup of measuring cutting torque

Fig. 4 Measurement of size of GFRP chips

Fig. 5 Measurement of size of Copper chips

表2は実験に用いるドリルの主な仕様を示す。図6にドリルの外観写真を示す。ドリルはルーマ型ツイストドリルであり、GFRPが内装銅箔の端面に薄く付着するスミアの抑制および内壁粗さ向上に効果があるアンダーカ

ットタイプである。アンダーカットタイプはドリルマージン部の長さが短く、穴内壁との接触長さが短い。このため穴あけ加工時の被削材との摩擦が低減され、穴内壁の品質向上に効果があり生産現場で多く採用されている。ドリル材質は生産現場で多く採用されている超硬合金(K10 相当)のコーティングなしを用いた。表 3 は本実験に用いた切削条件を示す。ドリル回転数が切りくず排出性におよぼす影響を検討するためにドリルメーカー推奨条件であるドリル回転数 $100 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ を基準とし $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ 、 $100 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ および $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の 3 種類の回転数を用いる。ドリル送り量はドリル折損が生じにくい最大送り量 0.02 mm/rev を用いる。切削油剤は用いていない。PCB スルーホール穴あけ加工では、バリの発生抑制や穴位置精度などの加工穴品質の向上を目的に、ドリルの侵入側である PCB 最上層の銅箔層上面にエントリーボードという当て板が用いられるが、本実験では切りくず排出状況や切りくず観察を単純化するためにエントリーボードは用いていない。

図 7 は、ドリル逃げ面の最大摩耗幅 V_B の測定方法を示す。本研究においては、以下ドリルの逃げ面摩耗を工具摩耗、ドリル逃げ面の最大摩耗幅 V_B を工具摩耗幅 V_B と呼ぶ。工具摩耗幅 V_B はドリルの外周部における新品ドリルの切れ刃稜線からの摩耗幅であり、2 枚の切れ刃について測定し平均値を工具摩耗幅 V_{Bm} とする。なお、本実験において用いるドリルは、工具摩耗の影響を検討する場合以外の実験では、切削条件ごとにすべて新品ドリルを用いる。

Table 2 Specifications of micro drill

Material	Tungsten carbide
Diameter	0.25mm
Flute length	4.5mm
Helix angle	45°
Point angle	140°
Web thickness	0.105mm
Overall length	38.1mm

Table 3 Cutting conditions

Rotational speed	$20 \times 10^3, 100 \times 10^3, 160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$
Feed rate	0.02 mm/rev

Fig. 6 Photograph of drill

Fig. 7 Measurement of wear width of worn drill

3. 実験結果と考察

3・1 ドリル切れ刃稜線と被削材の接触状態が切りくず生成におよぼす影響

4 枚重ね PCB の穴あけ加工においては、穴深さに伴いドリル切れ刃稜線と被削材の接触状態が変化する。4 枚重ね PCB を構成するそれぞれの PCB は上から順に n 枚目 PCB ($n=1 \sim 4$) と呼ぶ。図 8 は 4 枚重ね PCB の穴あけ加工 1 サイクルにおける穴あけ過程において、ドリル切れ刃稜線と被削材の接触状態をパターン I からパターン III の 3 つに分類して示す。図の中の①～⑮は、ドリルチゼル部およびドリル肩部が 4 枚重ね PCB の銅箔層と GFRP 層の境界部を通過する位置を示す。なお⑯は PCB の銅箔層とバックアップボードの境界部を通過する位置を示す。

パターン I はドリルチゼル部が 1 枚目 PCB の上側銅箔層への接触開始位置からドリルチゼル部が 1 枚目 PCB の下側銅箔層への接触開始位置までの範囲 (①～⑤) である。図 8 において①はドリルチゼル部が 1 枚目 PCB の上側銅箔層への開始位置、②は 1 枚目 PCB の GFRP 層への接触開始位置を示す。③はドリル肩部が 1 枚目 PCB の上側銅箔層への開始位置、④はドリル肩部が 1 枚目 PCB の GFRP 層への接触開始位置を示す。⑤はドリルチゼル部が 1 枚目 PCB の下側銅箔層への接触開始位置を示す。①から②までは銅箔層のみの切りくずがドリルチゼル

部付近の切れ刃で生成され、②から④までは銅箔層および GFRP 層の切りくずが同一切れ刃で生成される。④から⑤までは GFRP 層の切りくずのみが生成される。

パターンⅡは、ドリルチゼル部が n 枚目 ($n=1\sim3$) PCB の下側銅箔層への接触開始位置から、ドリルチゼル部 ($n+1$) 枚目 PCB の下側銅箔層への接触開始位置までの範囲 (⑥～⑫) である。図 8 において、⑥はドリルチゼル部が n 枚目 PCB の下側銅箔層への接触開始位置、⑦は ($n+1$) 枚目 PCB の下層銅箔層への接触開始位置、⑧は ($n+1$) 枚目 PCB の GFRP 層への接触開始位置を示す。⑨はドリル肩部が n 枚目 PCB の下側銅箔層への接触開始位置、⑩は ($n+1$) 枚目 PCB の下側銅箔層への接触開始位置、⑪は ($n+1$) 枚目 PCB の GFRP 層への接触開始位置を示す。⑫はドリルチゼル部が ($n+1$) 枚目 PCB の下側銅箔層への接触開始位置を示す。⑥から⑪までは、銅箔層および GFRP 層の切りくずが同一切れ刃から同時に生成され、⑪から⑫までは GFRP 層の切りくずのみが生成される。

パターンⅢは、ドリルチゼル部が 4 枚目 PCB の下側銅箔層への接触開始位置からドリル肩部が 4 枚目 PCB の下側銅箔層への接触が完了するまでの範囲 (⑬～⑯) である。⑬はドリルチゼル部が 4 枚目 PCB の下側銅箔層への接触開始位置、⑭は 4 枚目 PCB の下側銅箔層への接触終了位置を示す。⑮はドリル肩部が 4 枚目 PCB の下側銅箔層への接触開始位置、⑯はドリル肩部が 4 枚目 PCB の下側銅箔層への接触完了位置を示す。⑬から⑯までは、GFRP 層および銅箔層の切りくずが同一切れ刃から同時に生成される。⑯から⑰までは、銅箔層およびのバックアップボード材の切りくずが生成される。

以上の検討結果より、PCB4 枚重ねの穴あけ加工は銅箔層、GFRP 層およびバックアップボード材からなる異材質加工であり、穴あけ加工 1 サイクルの穴あけ過程においてはドリル切れ刃稜線と被削材である PCB との接触状態によって同一切れ刃稜線上で同時に生成される切りくず材質は、銅箔層のみの場合、GFRP 層のみの場合、銅箔層と GFRP 層の場合、および銅箔層とバックアップボード材の場合の 4 種類の切りくず生成パターンが生じている。異材質の同一切れ刃上での同時加工は、切れ刃稜線における切りくず流出速度や切りくず形状やドリル溝内での切りくず排出性に大きな影響をおよぼすことが推察される。なお本研究においては PCB の切りくずについて検討するためにバックアップボード材の切りくずについては検討から除外する。

Fig. 8 Schematic illustration of positional relationship between cutting edge and PCB

3・2 ドリル回転数が切りくず排出性および切りくず形状におよぼす影響

図 9 はドリル送り量を 0.02mm/rev 一定とし、ドリル回転数を $20\times 10^3\text{min}^{-1}$ 、 $100\times 10^3\text{min}^{-1}$ および $160\times 10^3\text{min}^{-1}$ へ変化させた場合における PCB 穴あけ加工 1 サイクルの切りくず排出状況を、高速度カメラを用いて撮影した静止画像を示す。ドリルは工具摩耗の影響を除くために切削条件ごとに新品ドリルを用いている。図 9 において、左側から 1 列目は穴あけ加工 1 サイクルの模式図を示しており、上から下に向かって穴あけ加工が進行している状況を示す。左側から 2 列目、3 列目、4 列目はドリル回転数が $20\times 10^3\text{min}^{-1}$ 、 $100\times 10^3\text{min}^{-1}$ 、 $160\times 10^3\text{min}^{-1}$ の場合である。最上段から 3 段目までは穴あけ過程であり、最下段は戻し過程を示している。

図9の最上段は、穴あけ過程における加工穴表面からドリルチゼル部の穴深さが0.4mm付近の切りくず排出状況を示す。ここでは1枚目PCBのGFRP層穴あけ加工を行っており、図8におけるパターンⅠの④から⑤の範囲に対応する。ドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合（左側から2列目）はPCB1枚目の上側銅箔層を穴あけ加工した際に生成された銅箔切りくずが穴入口部付近においてドリルに巻きついており切りくず詰まりが生じていることがわかる。ドリル回転数が $100 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合（左側から3列目）は、ドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合に比べて銅箔切りくずの巻き付きは少なくGFRP切りくずが飛散していることがわかる。ドリル回転数が $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合（左側から4列目）は、切りくず詰まりは発生しておらずGFRPの粒状の切りくずが加工穴外部へ飛散しておりドリル回転数が $100 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合に比べて切りくず排出性がさらに向上していることがわかる。

Fig. 9 Photographs of chip-evacuation with high-speed motion camera

図9の上から2段目は、穴あけ過程において加工穴表面からドリルチゼル部の穴深さが1.6mm付近の切りくず排出状況を示す。ここでは3枚目PCBの上側銅箔層穴あけ加工を行っており、図8におけるパターンⅡの⑦から⑧の範囲に対応する。図9の上から3段目は、穴あけ過程において加工穴表面からドリルチゼル部の穴深さが3.2mm付近の切りくず排出状況を示す。ここでは4枚目PCBの下側銅箔を穴あけ加工を行っており、図8におけるパターンⅢの⑬から⑭の範囲に対応する。ドリルチゼル部の穴深さが1.6mm付近（上から2段目）および3.2mm付近（上から3段目）では、いずれの場合もドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ では銅箔切りくずが穴入口部付近におい

てドリルに巻きついており切りくず詰まりが生じている。一方、ドリル回転数が $100 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ および $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合はドリル回転数の増大に伴い切りくず排出性が向上していることが確認される。

図9の上から4段目は、穴あけ完了後のドリルの戻し過程である。ドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合は、穴あけ過程において排出されなかった GFRP 切りくずがドリル溝を完全に覆うように付着しており切りくず詰まりが生じているのがわかる。ドリル回転数が $100 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合は、加工穴外部へ排出されなかった銅箔切りくずおよび GFRP 切りくずがドリル先端付近に巻き付いているものの、ドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合に見られたようなドリル溝を完全に覆う状況は発生していない。ドリル回転数が $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合は、切りくず巻き付きおよびドリル溝に付着する切りくずはみられず穴あけ過程での切りくず排出性が良好であることがわかる。高速度カメラを用いた切りくず排出状況の動画観察からも、ドリル送り量を 0.02 mm/rev 一定としドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ から $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の範囲においては、ドリル回転数が高くなるに伴い切りくず排出性が良好であることが確認されている。

図10はドリル送り量を 0.02 mm/rev 一定とし、ドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ 、 $100 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ および $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ へ変化した場合の GFRP 切りくず写真を示す。ドリル回転数が高くなるに伴い小さな粒形状の GFRP 切りくずが排出されており、ドリル回転数が低くなるに伴い大きな塊状の GFRP 切りくずが排出されている。特に、ドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合はドリル溝形状が転写されたような湾曲した塊状の切りくずが観察される。高速度カメラを用いた切りくず排出状況の観察において $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合は切りくず排出性が悪く、図9に示すように戻し過程においてドリル溝に付着した切りくず詰まりが観察されており、これらの GFRP 切りくずがドリル回転中にドリル溝から剥離し脱落したものと推察される。

図11はドリル送り量を 0.02 mm/rev 一定とし、ドリル回転数を $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ 、 $100 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ および $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ へ変化した場合における銅箔切りくず写真を示す。いずれのドリル回転の場合においても、銅箔切りくずは GFRP 切りくず形状に比べて細長い形状である。これは GFRP 切りくずの場合はき裂型切りくずに分類されるのに対して、銅箔切りくずの場合は流れ型切りくずに分類されるためである。さらには、いずれのドリル回転の場合においても、銅箔切りくずには GFRP 切りくずの付着が観察される。これは図8に示したように、銅箔層が切削される場合は、ドリルの同一切れ刃稜線で GFRP 層も同時に生成されるためであると推察される。

図12はドリル送り量を 0.02 mm/rev 一定とし、ドリル回転数が GFRP 切りくず長さ $l_m(\text{GF})$ および銅箔切りくず長さ $l_m(\text{Cu})$ におよぼす影響を示す。GFRP 切りくずの場合はドリル回転数が高いほど切りくず長さ $l_m(\text{GF})$ は短く、ドリル回転数が低いほど切りくず長さ $l_m(\text{GF})$ は長いことがわかる。銅箔切りくず $l_m(\text{Cu})$ の場合は GFRP 切りくずのようなドリル回転数の変化に伴う切りくず長さ $l_m(\text{GF})$ の変化はほとんどみられない。

Fig. 10 Photographs of GFRP chips

Fig. 11 Photographs of copper chips

Fig. 12 Relationship between rotational speed and chip size

以上のように、高速度カメラを用いた切りくず排出状況の観察および顕微鏡を用いた切りくず観察から、本実験条件の範囲ではドリル回転数が切りくず排出性や切りくず形状に影響をおよぼしていることがわかる。具体的には、ドリル回転数が高くなるに伴い切りくず排出性は向上し、**GFRP** 切りくず形状は細かい粒形状へ変化し切りくず長さは短くなる。一方、ドリル回転数が低くなるに伴い切りくず排出性は悪化し、**GFRP** 切りくず形状は大きな塊形状へ変化し切りくず長さは長くなる。

図 13 は穴深さ H でのドリル溝内の切りくず排出状況の模式図およびドリル溝面を展開した切りくず排出モデル図を示す。図 13 (a)は切りくず排出性の良好なドリル回転数の高い場合であり、図 13 (b)は切りくず排出性の悪化しているドリル回転数の低い場合である。切りくず排出を阻害する力 F_1 の主なものは、切りくず表面とドリル溝表面との摩擦力および切りくず表面と加工穴内壁面との摩擦力であると考えられる。図 13 (a)および図 13 (b)に示す θ はドリルねじれ角であり、本実験では $\theta=45^\circ$ である。

ドリル回転数 $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ に対して $100 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ 、 $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ へとドリル回転数が低くなるに伴い、ドリル切れ刃稜線において生成される切りくず速さは遅くなり、ドリル溝内の切りくずが押し出される速さも遅くなる。ドリル溝内での切りくずは一定速さで移動しているのではなく、静止したり動いたりしており、切りくず表面とドリル溝表面との摩擦力および切りくず表面と加工穴内壁面との摩擦力には静摩擦と動摩擦の両方が混在している。ドリル回転数が低くなると、ドリル溝内の切りくずは低速で加工穴入り口に向かって排出されるため、切りくずがドリル溝内で静止する可能性が大きくなり、静摩擦の比率は大きくなる。よって、ドリル回転数が低くなるに伴い加工穴深さ H における切りくず排出を阻害する力 F_1 は大きくなる。すなわち、ドリル回転数が高くなるに伴い切りくず排出性は良好になり、ドリル回転数が低くなるに伴い切りくず詰まりが生じやすく、切りくず排出性は悪化すると考えられる。

切りくず詰まりが発生しない浅穴加工では、ドリル回転数の大小に関わらずドリル切れ刃稜線で生成される **GFRP** 切りくず形状は小さな粒形状であることを確認している。図 13(a)(b)においてドリル切れ刃稜線付近に存在している **GFRP** 切りくず(**GFRP chips near cutting edge**)は、切りくず詰まりの影響を受けていない小さな粒形状の **GFRP** 切りくずである。図 13(a)はドリル回転数が高い場合を示す。ドリル切れ刃稜線で生成された小さな粒形状の **GFRP** 切りくずは塊形状に変化することなく排出されており、ドリル切れ刃稜線付近に存在する **GFRP** 切りくずとドリル溝内を流れる **GFRP** 切りくずは同じ大きさで表している。図 13(b)はドリル回転数が低い場合を示す。ドリル溝内の切りくず詰まりによってドリル切れ刃稜線で生成された小さな粒形状の **GFRP** 切りくず同士が圧着することで大きな塊形状へと変化する。図 13(b)ではドリル切れ刃稜線付近に存在する切りくずに比べてドリル溝内の切りくずは大きな形状で表している。また、**GFRP** 切りくずが圧着され **GFRP** 切りくず間の隙間が小さくなることで銅箔切りくず間の距離は短くなっている。図 13(a)(b)に示す銅箔切りくずおよび **GFRP** 切りくずの大きさは図 10,11,12 に示す切りくずの大きさを反映している。

図 13(a)および図 13(b)においてドリル切れ刃稜線において生成される切りくずの押し出し力を F_2 とすると、ド

リール回転あたりにドリル切れ刃稜線で生成される切りくず生成量はドリル回転数の大小に関わらず一定であるため、 F_2 はドリル回転数の影響は受けない。ドリル溝内の切りくずを加工穴外部に排出させるためには、 F_2 は切りくず排出を阻害する力 F_1 に比べて大きい必要があり、 F_1 が大きくなるに伴い切りくず詰まりが生じやすい。切りくず詰まりが発生すると、切りくず表面とドリル溝表面とのドリル回転方向の摩擦力および切りくず表面と加工穴内壁面とのドリル回転方向の摩擦力が増大し切削トルクが上昇する。

Fig. 13 Schematic illustration of chip-evacuation

3・3 ドリル回転数が切削トルクにおよぼす影響

図 14 は、ドリル送り量を 0.02mm/rev 一定としドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{min}^{-1}$ および $160 \times 10^3 \text{min}^{-1}$ の場合での穴あけ過程における加工穴深さに対する切削トルクの推移を示す。ドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{min}^{-1}$ の場合は、加工穴深さが 3 枚目 PCB の GFRP 層を穴あけ加工している途中から切削トルクが上昇し、4 枚重ねの PCB を穴あけ完了しバックアップボードを貫通した時点で最大切削トルク $T_{\max} = 3.88 \times 10^{-3} \text{Nm}$ に到達している。高速度カメラを用いた切りくず排出性の観察結果から加工穴深さが深くなるに伴い切りくず排出性が悪化しており、ドリル溝に滞留した切りくずを穴外部へ排出するために切削トルクが上昇したものと考えられる。

Fig. 14 Relationship between depth of hole and cutting torque

一方、ドリル回転数が $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合は、加工穴深さが深くなるに伴い切削トルクは上昇傾向にあるが、切削トルク上昇の傾きはドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合に比べて緩やかである。穴あけ加工中の最大切削トルクは PCB4 枚目を穴あけ加工中の $T_{\max} = 0.93 \times 10^{-3} \text{ Nm}$ であり、ドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ での最大切削トルクに比べて約 24%と低い値を示している。ドリル回転数および加工穴深さが切削トルクにおよぼす影響は、高速度カメラを用いた切りくず排出性の観察結果とよく一致している。すなわち、切りくず排出性が悪化するに伴い切削トルクが上昇していることがわかる。図 15 は、ドリル送り量を 0.02 mm/rev 一定としドリル回転数が $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ から $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の範囲において穴あけ過程での最大切削トルク $T_{\max}$ および平均切削トルク T_a におよぼすドリル回転数の影響を示す。ここで、平均切削トルク T_a は、穴あけ過程での加工穴深さにおけるそれぞれの切削トルクの値を積分し、穴あけ深さで除した値と定義する。

以上のように、本実験条件の範囲では穴あけ加工中の最大切削トルクおよび平均切削トルクは、いずれもドリル回転数が高くなるに伴い低減傾向にある。特に切りくず詰まりの影響を受けやすい最大切削トルク $T_{\max}$ の低減割合が大きくドリル折損対策に効果があることがわかる。さらには、穴深さが深くなるに伴い切削トルクは上昇しており切削トルクの変動は高速度カメラで観察される切りくず排出性の良否にほぼ対応している。すなわち、切りくず排出が良好な場合は切削トルクの値は低くなり、切りくず排出性が悪化し切りくず詰まりが生じると切削トルクの値は増大する。

Fig. 15 Relationship between rotational speed and cutting torque

3・4 工具摩耗が切りくず排出性および切りくず形状におよぼす影響

新品ドリルを用いた実験ではドリル送り量 0.02 mm/rev の場合は上述のように、ドリル回転 $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合はドリル回転数 $100 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ および $20 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ の場合に比べて切りくず排出が良好であることがわかった。切りくず排出性が良好である切削条件（ドリル送り量 0.02 mm/rev 、ドリル回転 $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ ）を用いて加工穴数 3000 穴までの穴あけ加工実験を行い工具摩耗が切りくず排出性や切りくず形状におよぼす影響を検討する。

図 16 は加工穴数が 1 穴、1000 穴および 3000 穴加工後の工具摩耗写真を示す。加工数の増加に伴い工具摩耗が増大しており、ドリル逃げ面においてドリル外周部が欠肉しているのがみてとれる。図 17 は、工具摩耗幅 V_{Bm} の加工穴数に対する推移を示す。加工数の増加に伴い工具摩耗幅 V_{Bm} が増大している。工具摩耗の増大に伴いドリル切れ刃稜線の丸み半径も増加傾向にあると推察され刃先稜線近傍では工具のすくい角は負角として作用すると思われる。

図 18 は、ドリル回転数 $160 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ 、ドリル送り量 0.02 mm/rev の切削条件を用いて、加工穴数が 1 穴目、1000 穴目および 3000 穴目における PCB 穴あけ加工 1 サイクルの切りくず排出状況を、高速度カメラを用いて撮影した静止画像を示す。図において、左側 1 列目は穴あけ加工 1 サイクルの模式図を示しており、上から下に向かって穴あけ加工が進行している。左側 2 列目、3 列目、4 列目は加工穴数が 1 穴目、1000 穴目および 3000 穴目の場合である。

図 18 において最上段から 3 段目までは穴あけ過程であり、最下段は戻し過程を示している。最上段から 4 段目までに示すドリルチゼル部と加工穴表面からの穴深さとの位置関係は、図 9 に示す位置関係とすべて同じである。最上段は、穴あけ過程における加工穴表面からドリルチゼル部の穴深さが 0.4mm 付近の切りくず排出状況を示す。加工穴数が 1 穴目、1000 穴目および 3000 穴目のすべての場合において切りくず詰まりは生じておらず切りくず排出性は良好である。一方、加工穴数が増加し工具摩耗が増大するに伴い、排出される GFRP 切りくずの大きさが変化している。特に、加工穴数が 3000 穴目の場合では、加工穴数 1 穴目に比べて GFRP 切りくず粒形状の大きさが大きくなっているのが特徴的である。高速度カメラを用いた動画観察からは切りくず排出詰まりは生じておらず切りくず排出性は良好であることから、加工穴数 3000 穴目における GFRP 切りくずの粒形状が加工穴数 1 穴目に比べて大きくなっているのは切りくず詰まりによる影響ではなく、刃先稜線での切りくず生成時の GFRP 切りくずそのものが大きくなっていると考えられる。

Fig. 16 Photographs of new drill and worn drill after 1000 and 3000 hits

Fig. 17 Relationship between number of drilled hole and flank wear

図 18 の上から 2 段目および 3 段目は、穴あけ過程において加工穴表面からドリルチゼル部の穴深さが 1.6mm 付近および 3.2mm 付近の切りくず排出状況を示す。いずれの穴深さにおいても切りくず詰まりは生じておらず、加工穴数の増加に伴って GFRP 切りくずの粒形状が大きくなる現象はみられない。一方、いずれの穴深さにおいても加工穴数が増加し工具摩耗の増大に伴い GFRP 切りくずの粒形状の大きさは大きくなっている。これは、加工穴深さ 0.4mm 付近の場合と同様に、切りくず詰まりによる影響ではなく、刃先稜線での切りくず生成時の GFRP 切りくずそのものが大きくなっていると考えられる。

図 18 の上から 4 段目は、穴あけ完了後のドリルの戻し過程である。加工穴数が 1 穴目、1000 穴目および 3000 穴目のいずれの場合においても切りくず巻き付きおよびドリル溝に付着する切りくずはみられず穴あけ過程での切りくず排出性は良好であることがわかる。

図 19 は、加工穴数 1 穴目、1000 穴目および 3000 穴目に排出された GFRP 切りくず写真を示す。加工穴数が増加し工具摩耗が増大するに伴い GFRP 切りくずは切りくずの粒形状が大きくなっている。切りくず形状から GFRP 層切りくずはき裂型に分類される。工具摩耗の少ない切り刃が鋭利な場合は切れ刃から切れが進行する前

方に向かうき裂が発生することで粒の小さい切りくずが生成されるが、工具摩耗が増大し切れ刃丸みが大きな場合は切れ刃が進行する前下方に向かうき裂が発生し、粒の大きい切りくずが生成されると推察される。これらのGFRP層切りくずの大きさの加工数に伴う変化は、高速度カメラを用いた切りくず排出状況の観察結果と同様である。図20は、加工穴数1穴目、1000穴目および3000穴目に排出された銅箔切りくず写真を示す。切りくず形状から銅箔切りくずは流れ型に分類される。加工穴数が増加し工具摩耗が増大するに伴い刃先丸みが大きくなる。これによりせん断ひずみ量が増大し、銅箔切りくずが加工硬化によって脆化し分断しやすいと推察される。

Fig. 18 Photographs of chip-evacuation with high-speed motion camera

Fig. 19 Photographs of chip-evacuation with high-speed motion camera

Fig. 20 Photographs of copper chips

図 21 は、工具摩耗の増大に伴う GFRP 切りくず長さ $\ell_m(\text{GF})$ および銅箔切りくず長さ $\ell_m(\text{Cu})$ の推移を示している。GFRP 切りくずの場合は工具摩耗増大に伴い切りくず長さが長くなっている。銅箔切りくずの場合は加工穴数が増加し工具摩耗が増大するに伴い切りくず長さは短くなっている。

以上のように、高速度カメラを用いた切りくず排出状況の観察および顕微鏡を用いた切りくず観察から、工具摩耗が増大するに伴い GFRP 切りくずの大きさが大きくなり、銅箔切りくずは長さが短くなることがわかった。工具摩耗が増大するに伴い刃先丸みが大きくなり、GFRP 切りくず形状や銅箔切りくず長さに影響をおよぼしていると推察される。図 19、図 20 より切りくず生成後に切りくずが詰まって圧着される現象は観察されず、切りくず排出性が良好なため工具摩耗が切りくず排出性におよぼす影響は小さいと考えている。

Fig. 21 Relationship between number of drilled holes and chip size

4. 結 言

- (1) PCB4 枚重ねの穴あけ加工は異材質加工であるため、ドリル切れ刃稜線と被削材である PCB との接触状態によって、銅箔切りくずのみ、GFRP 切りくずのみ、銅箔切りくずと GFRP 切りくず、銅箔切りくずとバックアップボード材の切りくずの 4 種類の切りくず生成パターンが生じ、1 種類の材質を穴あけ加工する場合に比べ切りくず形状や切りくず排出性が複雑である。
- (2) ドリル回転数が低くなるに伴い切りくず詰まりが発生しやすく、切りくず排出性は悪化する。切りくず詰まりが発生した場合はドリル切れ刃稜線で生成された小さな粒形状の GFRP 切りくず同士がドリル溝内において圧着し、大きな塊形状となり切りくず長さは長くなる。一方、銅箔切りくずはドリル回転数の変化に伴う切りくず長さの変化はほとんどみられない。
- (3) ドリル回転数が低くなるに伴い切りくず詰まりが発生しやすい。切りくず詰まりが発生すると、切りくず表面とドリル溝表面との摩擦力および切りくず表面と加工穴内壁面との摩擦力が増大し切削トルクが上昇する。
- (4) 工具摩耗の増大に伴い切れ刃丸みが大きくなり、ドリル切れ刃稜線で生成される GFRP 切りくずは大きくなる。他方、銅箔切りくずはせん断ひずみ量が増大し、切りくずが分断しやすくなる。ドリル回転数の高い領域では、工具摩耗は切りくず排出性にほとんど影響をおよぼさない。
- (5) ドリル回転数の増加に伴い切りくず排出性は向上する。ドリル一回転当たりの送り量が一定の場合、ドリル

回転数を上げることが出来、ドリル送り速度を大きくすることが可能となり生産性は向上する。一方、ドリル回転数の増加に伴い、切削温度上昇による加工穴内壁の樹脂の溶融や工具摩耗増大による切削性能低下が懸念されるため検討が必要である。切りくず排出性をさらに向上させるためにはドリル溝部への摩擦係数の低いコーティング材の採用などが考えられる。

文 献

- 大幸洋一, 寺林隆夫, 梶田正美, プリント基板の小径ドリル加工 (第1報) —切削抵抗からみた切りくず排出機構の解明—, 精密工学会誌, Vol.60, No.12 (1994), pp.1796-1800.
- Heineman, R., Barrow, S.H.G and Petuelli, G., The Performance of Small Diameter Twist Drills in Deep-Hole Drilling, Transaction of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.128, No.11 (2006), pp.884-892.
- 岩田一明, 森脇俊道, 星川雅之, 高速微小深穴ドリル加工の基礎的研究, 精密機械, Vol.49, No.2 (1982), pp.240-246.
- Mellinger, J.C., Ozdoganlar, O.B., Devor, R.E. and Kapoor, S.G., Modeling Chip-Evacuation Forces in Drilling for Various Flute Geometries, Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.125, No.8 (2003), pp.405-415.
- 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, Vol.43, No.508 (1977), pp.427-432.
- 大久保修, 稲崎一郎, 青山藤詞郎, 清水哲, 微小径ドリルの折損原因の究明と折損予知に関する研究, 日本機械学会論文集 C編, Vol.51, No.471 (1985), pp.2929-2935.
- 小野元久, 菅原章, 矢野宏, 微小径ドリル加工に関する研究 (第1報) —切削抵抗の測定について—, 精密工学会誌, Vol.58, No.8 (1992), pp.1345-1350.
- Subramanian, K. and Cook, N.H., Sensing of Drill Wear and Prediction of Drill Life, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.99, No.295 (1977), pp.295-301.
- 渡邊英人, 津坂英夫, 梶田正美, プリント配線板における高速微小穴あけ加工—PCB 構成材料のドリル折損への影響—, 精密工学会誌, Vol.75, No.12 (2009), pp.1428-1433.

References

- Daikoh, Y., Terabayashi, T. and Masuda, M., Micro drilling of printed circuit boards (1st Report) —Cutting Force and Chip Flow Mechanism—, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.60, No.12 (1994), pp.1796-1800 (in Japanese).
- Heineman, R., Barrow, S.H.G and Petuelli, G., The performance of small diameter twist drills in deep-hole drilling, Transaction of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.128, No.11 (2006), pp.884-892.
- Iwata, K., Moriwaki, T. and Hoshikawa, M., Fundamental study of high speed micro deep drilling, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.49, No.2 (1982), pp.240-246 (in Japanese).
- Mellinger, J.C., Ozdoganlar, O.B., Devor, R.E. and Kapoor, S.G., Modeling chip-evacuation forces in drilling for various flute geometries, Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.125, No.8 (2003), pp.405-415.
- Nakayama, K. and Ogawa, M., Cutting performance of twist drills in relation to the shape of chip produced, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.43, No.508 (1977), pp.427-432 (in Japanese).
- Okubo, O., Inasaki, I., Aoyama, T. and Shimizu, T., A study on the cutting tool breakage and its prediction in micro hole drilling, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.51, No.471 (2009), pp.2929-2935 (in Japanese).
- Ono, M., Sugawara, A. and Yano, H., Study on micro drill machining (1st Report) —On the measurement of cutting force—, Journal of Japan Society for Precision Engineering, Vol.58, No.8 (1992), pp.1345-1350 (in Japanese).
- Subramanian, K. and Cook, N.H., Sensing of drill wear and prediction of drill life, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.99, No.295 (1977), pp.290-301.
- Watanabe, H., Tsuzaka, H. and Masuda, M., High-speed micro drilling on printed circuit boards —Influence of PCB composite material on drill breakage—, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.75, No.12 (2009), pp.1428-1433 (in Japanese).