プリント基板のレーザブラインドバイアホール加工における 高速度ビデオモニタ画像の解析と2色法による温度の可視化

廣垣 俊樹^{*1}, 青山 栄一^{*1}, 神吉 耕志^{*2}, 山口 隆太^{*1}

Estimation of monitoring image in laser blind via-hole drilling process of printed wiring boards with a high speed video camera and temperature visualization from obtained image by two-color method

Toshiki HIROGAKI^{*1}, Eiichi AOYAMA^{*1},
Kouji KANKI^{*2} and Ryouta YAMAGUCHI^{*1}

^{*1}Department of Mechanical Engineering, Doshisha University
1-3 Tatara-Miyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto 610-0321, Japan

^{*2}Graduate School at Doshisha University
1-3 Tatara-Miyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto 610-0321, Japan

Received: 5 January 2019; Revised: 18 March 2019; Accepted: 16 May 2019

Abstract

In the present report, we attempted to construct a useful monitoring method to control laser via-hole drilling process of multi-layer printed wiring boards with a high speed video camera. Cu direct laser drilling was performed for the FR-4 type insulation layer, which made of glass fiber reinforced epoxy resin plastics, with a CO₂ laser beam. First, we discussed the influence of laser irradiating conditions on the drilled via-hole quality based on estimating the visible video camera images. Second, we focused on two-color method to visualize the temperature distribution in monitoring image. As a result, the high speed video monitoring and the temperature visualization in video image are found to be effective to control the via-hole quality in laser processing.

Keywords: Laser via hole drilling, High speed camera monitoring, Temperature visualization, Two-color method, Printed wiring boards

1. 緒 言

近年, IoT (Internet of Things)を支えるため携帯電話, スマートフォンに代表される電子機器類の小型化, 軽量化, 高性能化の要求に合わせて, プリント基板も微細化, 薄型化, 多層化が求められている. そのため 1990 年代後半よりビルドアップ工法で回路を超多層化したビルドアップ基板が実用化され, 最近の小型電子機器には欠かせないキーパーツとなっている. ビルドアップ工法は, ベースとなる従来プリント基板上にさらに絶縁層 (ビルドアップ層) と配線層を積み重ね, 層間の電気接続用止まり穴 (ブラインドバイアホール, 以下 BVH と称す) を加工する工程を繰り返すことによって超多層プリント基板を製造するものである. その BVH の形成技術も高度化してきており, 表面の回路銅箔と絶縁層を同時に貫通させる Cu ダイレクト炭酸ガスレーザ法が主流となっている. 炭酸ガスレーザの波長領域 (10 μ m) では, レーザ光が銅箔表面で反射されてしまうため, 近年は薄銅箔 (銅箔厚さ 10 μ m 程度以下) 表面にレーザ吸収性を高める処理を遂行して実用化が進められてきている(岡本他, 2011). その結果, 炭酸ガスレーザによる Cu ダイレクトバイアホール加工は, 内層回路パターン基準で穴あけするので

No.19-00009 [DOI:10.1299/transjsme.19-00009], J-STAGE Advance Publication date : 24 May, 2019

^{*1} 正員, 同志社大学理工学部 (〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3)

^{*2} 同志社大学大学院

E-mail of corresponding author: thirogak@mail.doshisha.ac.jp

穴位置ずれが少ないことが知られている。さらに表面の回路銅箔に前工程で穴エッチングを施しウィンド形成を施した後に炭酸ガスレーザによる BHV 加工を遂行するコンフォーマルマスク加工やラージウィンド加工に比べ、工程の共用化が可能なメリットも報告されてきている。極薄銅箔の採用は BVH 加工だけでなく、回路の細線化にも有利である(片岡, 2001)。しかしながら熱的な加工閾値の異なる銅と樹脂を同時に加工するため、銅箔部と樹脂部の穴径に差が生じ、穴入口部の断面で銅箔がその差だけ突き出るオーバハングと称される特有の品質の低下が生じる(片山他, 2014)。さらに穴は後工程で Cu メッキ処理されて回路接続に使用するので、BVH 内部や周辺の残存物や熱的ダメージの抑制など高い品質管理の技術が求められる。さらに BVH は 0.05~0.3mm 程度の微細穴で 500×600 mm サイズ量産基板で穴数が 30 万穴以上と多数のため、後工程でその不良検出の検査にも多くのコストが割かれている。したがって、その改善のためレーザ加工による BVH 形成中の熱影響の予想方法などの研究(廣垣他, 2003)を進めてきた。しかしながら抜本的な改善手法として、より上流工程であるレーザ BVH 形成中のインプロセス管理の技術開発が望まれていた。

そこで Cu ダイレクトレーザ加工による BVH 形成中のインプロセス管理のための手法の一つとして、先行研究(廣垣他, 2016)では近年の画像処理技術の進歩に着目して、高速度ビデオ画像で撮影して画面上の輝度値の総和の時間変化率に基づきレーザの照射時間を制御する手法を提案した。その結果、BVH 形成の可否の判定に有効であることを示すことができた。しかしながら、レーザ出力の影響やそれらが穴形状などの品質におよぼす影響、さらに加工中の温度や熱的影響などについての考察には至っていなかった。またレーザ出力、対象とする絶縁層の材質、撮影条件の違い等により画像上の輝度が変化するものと予想されるが、その影響に関する考察にも至っていなかった。そこで本報では、レーザ加工中の高速度ビデオカメラの画像に基づきレーザ出力、加工穴形状の関係について考察した。さらに画像がカラー情報を有する点に着目して、RGB 輝度に 2 色法を適用して温度画像とする手法を提案し、熱画像として温度換算することで撮影条件や撮影対象の影響を受けることなく、自由噴流の現象の変化に対して感度の高いモニタ手法となる可能性を示すことができたので結果を報告する。

2. 実験方法と提案する画像解析の手法

2・1 プリント基板の製造工程

本報で対象とする多層プリント基板のビルドアップ工法の例を図 1 に示す。①コア基板の両面に銅箔で回路パターン(後の内層回路)を形成、②その両面に絶縁層(ビルドアップ層)となる FRP と外層銅箔を積層(ビルドアップ)する、③レーザを用いて表面処理を施した外層の回路銅箔とビルドアップ層を同時に除去して穴加工し、その穴底に内層の回路銅箔を露出させる電気接続用 BVH を加工する、④ドリルを用いてグランド回路接続用などの貫通穴(スルーホール)を加工する、⑤デスミア処理などの洗浄後、銅めっきにより内層と外層回路の電氣的接続を行う、⑥エッチングで外層の回路パターンを形成する、ものである。

Fig.1 Typical production process of multi-layer PWB.

2・2 加工条件および撮影方法

レーザ穴加工には、炭酸ガスレーザ加工機 Firestar ti100f (米国シンラッド社製)を用いた。本機は炭酸ガスレーザを用いた微細加工などの分野で世界的に多数使用されている発振器である。励起方式が放電中の電子との衝

突で上位準位へ励起される RF (Radio Frequency) 放電式であり, ガス封じ切り運転でメンテナンス・信頼性が高い産業用の装置である. ピーク出力は定格出力 100 W で, PWM (パルス幅変調) 制御で出力を 0~95 W に変化させることができる.

加工試料として, 図 1 中の①に示されるコア基板はプリント基板材料として一般的な GFRP (ガラス繊維強化プラスチック ANSI・NEMA 規格 FR-4) とし, その表面の銅箔 (厚さ $35\mu\text{m}$) を内層回路 (BVH の穴底回路) とし, その表面に図 1 中の②で示されるように絶縁層 (厚み 0.2mm) をビルドアップさらに外層回路の薄銅箔 (厚み $12\mu\text{m}$) を積層した基板を用いた. GFRP の母材のプラスチックにはエポキシ樹脂を用いている. ここでビルドアップ絶縁層にも同様の GFRP (平織りガラスクロス 2 プライすなわち 2 層で強化), を用いた. 対象とした基板の概略を表 1 に示す. Cu ダイレクト加工法を対象とするため, 表面銅箔のレーザ吸収率を向上させる前処理として, アルカリ液中の次亜塩酸塩による酸化に基づく黒化処理による銅箔表面の針状化を施した. その後, レーザ照射による図 1 中の③の BVH 加工と撮影を遂行した.

図 2 に撮影状況を示す. 図 2 のように基板面に対してカメラの光軸が 20° の角度で撮影をする. レーザ加工機の発振制御の信号を高速度カメラ (キーエンス社製 VW-600C) にも接続してトリガ信号とすることで, レーザ照射と同時に撮影を開始した. 先行研究(廣垣他, 2016)も参考にして, 撮影時のフレーム数は 23000fps, シャッタースピードは $1/50000\text{ s}$ とし, 解像度は 192×256 とした. また, 加工穴の品質向上のためアシストガスには窒素を用いた.

Table 1 Processed sample.

Base material		Glass fiber
Core (mm)		FR-4 0.5 or 0.9t (Inner copper foil $35\mu\text{m}$)
Build up layer	Ply layer	2
	Thickness (mm)	t0.20
	Outer copper foil (mm)	$12\mu\text{m}$
Substrate thickness (mm)		t1.34

Fig.2 Experimental setup for monitoring a process.

2・3 加工穴の形状および直径の測定

Cu ダイレクトレーザ加工法は, 絶縁層の表面の回路銅箔 (以後, 外層銅箔) とその下の GFRP (絶縁層) を 1 パルスのレーザ照射で同時に加工し, 内層の回路銅箔 (以後, 内層銅箔) を露出させる BVH の形成法である. 穴入口部は, 銅と樹脂の熱的しきい値が大きくことなるため両者の加工穴径の差が顕著に生じ, その断面は図 3 に示すような外層銅箔が穴内部に突き出る品質低下(オーバーハング)が見られる. オーバーハングは Cu ダイレクト加工法の特徴の一つであり, 後工程の回路形成用の銅メッキ付き回り不具合やソルダーレジスト穴埋め時にボイドの発生などの要因となる(片山他, 2014). よってオーバーハング長さはバイアホール加工穴品質として重要かつ特徴的なパラメータである. そこで本報では図 4 のようなモデルにおいてオーバーハング長さ L を, 加工穴直径を D , エッチング後の絶縁層の加工穴直径を D' として式(1)のように定義する. また, 穴底径を D_b と定義する. D, D', D_b は加工穴を顕微鏡で観察して画像処理により測定した. すなわち, 加工穴を入口側より撮影 (上視) して D を測定し, 次にエッチング液で表面の外層銅箔を除去した後に再び上視して D', D_b を測定した. また一般に $D' \neq D_b$ となり, 絶縁層の穴壁面に図 4 中に示すテーパ角 θ も生じる.

$$L = \frac{D' - D}{2} \quad (1)$$

Fig. 3 Overhang after laser drilling.

Fig.4 Definition of D , D' and θ for blind via hole.

2・4 2次元軸対称の自由噴流モデルと加工中の動画の輝度値

BVHは絶縁層をレーザで除去し、内層回路の銅箔で止まり穴を形成している。レーザのエネルギーで主に絶縁層の樹脂が熱分解して気化し、それらが穴入口から噴出する現象と考えられる。噴出の現象は円形ノズルからの自由噴流(社河内, 2013)に近いものと考えられる。図5はその模式図で、2次元軸対称の自由噴流は初期領域で主に軸方向の高速流を形成する層流のポテンシャルコア領域とその周辺に存在する周囲の気体を巻き込む乱流の混合領域にモデル化される。噴流の外縁は仮想原点 O' より直線的に広がるものとされている。ここで、図6(a)にレーザ照射開始から様子をハイスピードカメラで撮影した連続画像を示す。噴出物はレーザのエネルギーにより高温となるため、画面上で発光して撮影される。図6(a)において t はレーザ照射開始からの経過時刻、 n はレーザ照射開始のフレームを0番目とした時のフレーム番号を示す。レーザ照射は紙面の向きにおいて上から下の向きで行った。時間が経過するにつれて、発光部分の面積が時間的に少し変動しながら次第に増大する様子がわかる。そこで連続画像に対して、 n , $n+1$ フレーム目の画像間で各画素の輝度の差分 $Diff_n$ を算出して、発光の変動を定量化した。フレーム間の差分の式を以下に示す。

$$Diff_n[i, j] = G_{n+1}[i, j] - G_n[i, j] \quad (2)$$

ここで、 $G_n[i, j]$ はフレームの i 行 j 列の画素の 8bit グレースケール値を示す。各画素において、グレースケール値は必ず正の整数でなければ画像として表示することができない。そのため、フレーム間の差分を画像として表すための式 $Diff'_n$ を以下に示す。

$$Diff'_n = Diff_n (Diff_n[i, j] > 0) \quad (3)$$

$$Diff'_n = 0 (Diff_n[i, j] \leq 0) \quad (4)$$

図6(a)に対して連続画像間の差分処理を施した結果を図6(b)に示す。 $n=5$ または 8 において、白色部分が環状を示すことがわかる。すなわち、ポテンシャルコア領域は層流に近く主に噴出物だけで構成され輝度の時間的な

Fig. 5 Schematic diagram of free jet flow from drilled via hole.

Fig. 6 Video images during laser drilling($P=50$ W).

変化はほとんど生じないが、その周辺の混合領域は乱流に近く周辺の空気も巻き込むために輝度の変化が大きいと考えられる。したがって、連続画像間の差分処理を施すことでレーザ照射時の噴流のポテンシャルコア領域を識別（差分画像で輝度がほぼゼロとなり環状の内側に黒く示される）することができることがわかった。

次に、画面上での発光している部分を詳しくみるために発光部の高さ、幅、画面上の面積に注目する。先行研究(廣垣他, 2016)では、1画面上のすべての画素の輝度の総和値に着目してその時間変化率に着目していたが、その中には種々の輝度ノイズが含まれているが、そのS/N比の確保についての検討には至っていなかった。そこで各フレーム画像をグレースケール化して輝度値のヒストグラムを作成した。その一例を図7に示す $P=95$ W, $t=3.0$ msの実験条件での80フレームの平均である。図中にはレーザ照射を行っていない場合の結果も併記している。レーザ照射を行っていない場合でも、グレースケール値が25以下の輝度を有する画素がかなり存在していることがわかる。したがって、このような場合には周辺ノイズを防止するため閾値を25以上に設定する方がS/N比の確保ができると考えられる。次にレーザ照射中のヒストグラムに着目する。輝度が200を超えるグレースケール値が多いが、50以下でも度数が上昇する傾向が見られる。後者には、対象に局所的な光源が存在し、その周辺に光沢性が高い面が存在するとその反射光を高い輝度で検出する反射グレア(岩田, 2008)による虚像も見られた。したがって可能な限り弱い発光（低い輝度）の画素まで評価する一方、反射グレアのノイズも考慮して対象とする輝度を設定（この場合は例えば63~200）した。

二階調化した画像と元の画像の一例を図8に示す。図8は元の画像を拡大したものである。図8のように、二値化した部分の高さ、幅、面積を、画素数を数えることで測定した。発光部の面積 A は次式で与えられる。

$$A = (\sum_{i,j \in I} I[i,j])/p(I) \quad (5)$$

ここで、 $I[i,j]$ は対象の画像 I の i 行 j 列の画素のグレースケール値を示し、 $p(I)$ は I 中の画素数を示す。また高さ、幅は、画像1辺の縦の画素数、横の画素数でそれぞれ無次元化して示す。図9に $P=50$ W, $t=3$ msの条件での高さ・幅・面積を示す。これより、いずれのデータも周期的に、同じ位相で変化していることがわかる。発光部の大きさは縦・横に収縮を繰り返していることがわかった。

これらの時間的な増減の影響を除去するために、移動平均法(Simple moving average, SMA)を用いた(廣垣他, 2016)。図9における面積 A を移動平均によって平滑化する。あるデータ系列 x を平滑化して得られた y を式(6)

に示す. ここで, N は移動平均点数を示す. ここで, 移動平均点数 N の決定式を式(7)に示す. 式において, f_n は遮断周波数, f_s サンプル周波数, Δt はサンプリング周期とする. N は, 式(7)で得られた値を, 最も近い奇数に繰り上げたものを採用する. 本報では, フレームレート 23,000 にて高速カメラを用いて撮影を行ったので, サンプル周期は $1/23,000$ s である. 図 9 から $1/f_c$ を求めると 0.301 ms となった. そのため, それらの値を式(7)に当てはめると $N=5$ となった. 図 10 にて, 図 9 の A を $N=3$ または $N=5$ で移動平均を行ったデータを示す. これより, $N=3$ では周期的な増減が除去しきれていないことがわかるが, $N=5$ では除去できており妥当であることがわかる.

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x[n-m] \quad (6)$$

$$N = \frac{0.443}{f_n} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{0.443}{f_n} f_s \quad (7)$$

Fig.7 Average grayscale histogram of images in laser drilling.

(a) Color image

(b) Binary image

Fig. 8 Color image and binary image in laser drilling.

Fig. 9 Height, width and bright area in laser drilling ($P = 50$ W). Fig. 10 Bright area A with SMA in laser drilling ($P = 50$ W).

2・5 2色法に基づく加工中の動画撮影によるRGBデータからの温度の推定

物体の温度の計測にはサーモグラフィカメラが用いられることが多いが, レーザ加工中の様子を撮影するには不適だと考えられる. レーザの波長とサーモグラフィカメラの感知する波長が近い場合は, サーマグラフィカメラの破損につながるおそれがあるため用いることが難しい. さらに, 画像の温度換算には対象表面の放射率を同定する必要があるが放射率の温度依存性の考慮が難しく, さらに複数の物体が混ざりそれぞれの放射率

が異なるような現象のモニタには適していない．一方，近年は溶接・溶射などの現象モニタで近赤外 2 色温度計の導入が進んでいる(和田，2013)が数 mm 以上の広い領域の毎秒十～数百程度のフレームレートでの定常現象のモニタが中心(鎌田他，2009)で，レーザバイアホール加工のようにサブ mm 以下のマイクロ領域で ms 以下の過渡現象を扱った例はない．そこで本報では，高温の物体に適して対象物体の放射率にしない手法として高速度カメラで取得した画像に対して 2 色法を適用する温度モニタを提案する．高速度カメラは RGB(Red Green Blue) カラーモデルで画像表現をしており，画像中の各画素の Red, Green, Blue の輝度値をそれぞれ R, G, B ，割合を r, g, b とし次式のように定義する．

$$r = \frac{R}{R + G + B}, g = \frac{G}{R + G + B}, b = \frac{B}{R + G + B} \quad (8)$$

(8)式で定義された r, g, b から噴出した飛散物の温度解析を行う．物体からの熱放射は温度が高くなるに従い可視光領域では赤色から青白い色になり，黒体においては温度と色の関係を色温度で表される．プランクの式に基づく黒体の温度と黒体が放射する可視光領域の熱放射割合である r_B, g_B, b_B (CIE1931 に基づく波長 700.0, 546.1, 435.8 nm) の理論的な関係(池田，1980)を図 11 に示す．図 11 からわかるように r_B, g_B は比較的低い温度からみられるため，それらを含む温度解析には R-G による画像 2 色法が適しているものと考えられる．絶対温度 T における黒体と温度測定対象の物体の R と G の明度をそれぞれ $R_0(T), G_0(T), R_1(T), G_1(T)$ ，放射率を $\varepsilon_R(T), \varepsilon_G(T)$ ，物体と測定システムの間の透過率を τ とし，灰色体近似($\varepsilon_R(T) = \varepsilon_G(T)$)とすると 2 色比として

$$\frac{R_1(T)}{G_1(T)} = \frac{\tau \varepsilon_R(T) R_0(T)}{\tau \varepsilon_G(T) R_1(T)} = \frac{R_0(T)}{G_0(T)} \quad (9)$$

が成り立つ．よって 2 色比を用いる 2 色法では物体の放射率 ε と透過率 τ の変化を考慮せずに， $R_0(T)$ と $G_0(T)$ の比から温度を推定することができる．すなわち図 11 に示す r と g の比から(9)式の右辺を算出することができる．

カラー高速度ビデオカメラが発展し，燃焼などの分野においてその有効性が検証(榎本他，2015)されてきているが，レーザ加工等の製造現場における応用には至っていなかった技術である．一方，撮影時の画質として手動モードでガンマ補正，オフセットは OFF，ホワイトバランスはすべて 1 に設定しているが，それでもカメラ固有の処理特性により取得される画像の r, g, b の関係は理論的な図 11 と若干異なる可能性がある．そのため，上式を用いる前に較正を行う必要がある．較正方法としては，図 2 中の基板の代わりに擬似黒体としてカーボン抵抗を置き，図 12 に示すようにその抵抗に電圧を印加して生じた発光を高速度カメラで撮影すると同時にその温度上昇を黒体放射として高速度カメラ型赤外線サーモグラフィカメラ (FLIR 社製 SC7600・検出温度域 5°C～2500°C) で撮影し，後者画像で 700°C 以上を示す画素を抽出しながら前者画像で該当する画素に対する 2 色比を求めた．後者の温度を横軸，前者の 2 色比を縦軸にプロットすると，図 13 のような物体の温度と，その際の RGB のデータの対応関係を得ることができた．図中において， r, g, b は較正実験中に得た値に対して， r_c, g_c, b_c はそれらの値から導いた較正曲線を示す．ここで，較正曲線は実験で得た r, g, b と，黒体放射の理論 RGB 値 r_B, g_B, b_B をもとに以下の式であらわした．

$$\begin{aligned} r_c(T) &= r_B^{n_r}(T + x_T) + x_r \\ g_c(T) &= 1 - r_c(T) - b_c(T) \\ b_c(T) &= b_B^{n_b}(T + x_T) + x_b \end{aligned} \quad (10)$$

ここで， n_r, x_r, n_b, x_b, x_T は定数とした．本報での較正では， $n_r = 1.4, x_r = -0.14, n_b = 0.6, x_b = 0.07, x_T = -100$ となった．図 13 および式(10)から求めた 2 つの色の成分の比である放射比 (2 色比) と，それに対応する温度の関係 (一例として g_c/r_c の関係を図 13 の校正点と共に図 14 に示す) をもとに，画像からの 2 色比を用いて熱画像として温度の可視化を行った．図 14 より，カメラ固有の処理特性に起因する差もみられ校正が不可欠であることもわかる．また 2 色法は熱放射の可視光を用いるため，700°C (973K) 程度以上の超高温領域の温度測定に適している(鎌田

他, 2009). しかし画像中には温度が低く発光量が小さい対象も含まれノイズ成分となる可能性がある. そこで高温領域でしきい値以上の輝度の画素のみに着目した. そこで明らかに室温と考えられる箇所に昇温が生じない画像を基準として, 256 階調のグレースケール画像上で輝度 h_v が 50 以上となる画素のみを抽出して熱画像化の対象とした.

Fig. 11 Relationship between RGB ratio and color temperature derived from a theory.

Fig. 12 Calibration of RGB-temperature relationship using RGB camera and thermography camera.

Fig. 13 Relationship between RGB values and temperature, obtained from calibration.

Fig. 14 Relationship between the calibrated radiation ratio and temperature.

3. 実験結果と考察

3・1 照射時間に対する直径と発光量 A の変化

レーザ出力を 4 水準の 25, 50, 75, 95 W で実験を行った. 照射時間 t は 3.0 ms までとした. それぞれの実験条件において, 高速度カメラで撮影した画像に対して式(5)の定義にしたがい設定した輝度以上の無次元画素数 A を計測した. それぞれの実験条件での直径 D , D' , D_b と A を図 15 に示す.

Cu ダイレクトレーザの加工プロセスにおいて, レーザ照射によって気化した絶縁層の樹脂が高圧となり, 外層銅箔を貫いた穴入口より自由噴流として噴出して飛散物となる現象が起こる. そのため, $D > 0$ となるのは照射開始後に発光が始まった時刻であると考えられる. 図 15(a)の最低出力である 25 W の照射においても $t = 0.3$ ms で発光と外層銅箔の除去が確認された.

レーザ照射による除去作用が進行して $D_b > 0$ となると, すなわち加工が内層銅箔に達したときに BVH が形成される. このとき, 発光部の面積 A は極大値を示すことが判明している (Kanki et al., 2016). 図 15 においても同様に極大値が生じることが確認できる. 図 16 にその要因を示す加工プロセスの模式図を示す. 図 16(a)に示すように, 内層銅箔に到達する前は深さ方向と径方向に同時に加工が進む. しかしながら, 図 16(b)に示すように内層

銅箔に達した後は径方向のみに穴の拡大加工が進む。そのため、内層銅箔に到達後は時間当たりの除去量が到達前と比較して減少すると考えられる。さらにレーザ照射のエネルギーの一部は穴底の内層銅箔の加熱にも消費される。そのため、時間当たりの噴出物の量（除去量）が減少し、動画上の面積 A が減少し、照射時間に対して極大値を示すものと考えられる。

(a) $P = 25$ W and $t = 3.0$ ms (b) $P = 50$ W and $t = 3.0$ ms (c) $P = 75$ W and $t = 3.0$ ms (d) $P = 95$ W and $t = 3.0$ ms

Fig. 15 Relationship between diameters and bright area in laser drilling.

(a) Before reaching the inner foil

(b) After reaching the inner foil

Fig. 16 Schematic diagram of processing variation from a view of cross section.

次に照射時間に対する直径の変化に注目する。図 15 において 4 水準すべての出力 P で、いずれの直径もある時刻から増加率が緩やかになっている。この時刻を変曲点として図中に示す。その結果、変曲点付近では画像上の面積が極大となることがわかる。これは前述した D' および D_b の増加率が緩やかになる現象の妥当性を示している。そこで図 4 の定義に基づき、穴の除去体積を次の式(11)で近似する。すなわち絶縁層厚さ h は一定で、 $D_b > 0$ となる時刻から内層銅箔を貫通するまでの時刻において穴の除去体積 V は、

$$V = \frac{\pi h}{12} (D'^2 + D' D_b + D_b^2) \quad (11)$$

なので、ここで図 15 において、 D' の時間に対する変化率を $\partial D' / \partial t$ 、 D_b の変化率を $\partial D_b / \partial t$ とすると、除去体積 V の微小時間 Δt の間における変化量 ΔV は次の式(12)で表すことができる。

$$\Delta V = \frac{\pi h}{12} \left\{ \left(\frac{\partial D'}{\partial t} \Delta t \right)^2 + 2D' \frac{\partial D'}{\partial t} \Delta t + D_b \frac{\partial D'}{\partial t} \Delta t + D' \frac{\partial D_b}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial D'}{\partial t} \frac{\partial D_b}{\partial t} (\Delta t)^2 + \left(\frac{\partial D_b}{\partial t} \Delta t \right)^2 + 2D_b \frac{\partial D_b}{\partial t} \Delta t \right\} \quad (12)$$

式(12)より、 $\partial D' / \partial t$ および $\partial D_b / \partial t$ の変化は除去体積に大きく影響することがわかる。図 15 において、直径の変曲点の前後で $\partial D' / \partial t$ はいずれも大きく減少していることが確認できたため、変曲点の前後で体積の変化率は減少することがわかる。したがって画面上の発光 A は変曲点の後に減少することもわかる。

止まり穴である BVH の加工は外層銅箔と絶縁層の除去を遂行する一方、内層銅箔を貫通してはならない。しかしながら、必要以上のエネルギーを加える内層銅箔を貫通する。穴底の内層銅箔の貫通する前後の上視画像を図 17 に示す。図 17(a)の焦点が合っている箇所が穴底の内層銅箔で図 4 中の D_b 部で、図 17(b)で金色部が内層銅箔の貫通穴でその回りで焦点が合っている黒色部が内層銅箔である。内層銅箔を貫通すると、さらに深い次の絶縁層の樹脂にレーザー光が達するため、そこからの飛散物が増加すると考えられる。図 15(c)および(d)において、貫通した時刻付近で面積 A が増加していることもわかる。ただし図中に示す D_b は内層銅箔の貫通穴が生成後も図 17(b)で焦点が合っている黒色部の内層銅箔の径である。

Fig. 17 Image of inner foil observed from hole entrance after laser drilling ($P = 95 \text{ W}$).

プリント基板のレーザー BVH 加工は止まり穴形成で除去対象の物質がすべて穴入口から噴出して飛散物となるため、それらを高速度カメラで撮影し 2・5 節で設定した輝度以上の面積 A に着目することで直径の変化等の品質管理の目安となる可能性を示すことができた。

3・2 加工穴の形状と投入熱量の関係の考察

前節で形成された BVH 穴の形状と投入熱量について検討しておく。図 15 において直径 D 、 D' 、 D_b は類似の傾向で増加している。そのため、直径の比 D'/D および D_b/D はおよそ一定値となることがわかる。ここで、図 4 の模式図において、穴入口の外層銅箔の突き出し長さ（オーバーハング） L およびテーパ角 θ は次の 2 式で表される。ここで、 h は絶縁層の厚みである。

$$\theta = 2 \tan^{-1} D \left[\frac{D'/D - D_b/D}{2h} \right] \quad (13)$$

そこで出力 $P=25, 50, 75, 95\text{W}$ における直径比とテーパ角と照射時間の関係を図 18 に示す. 図 15 における変曲点を示す時刻付近以降, 図 18 の直径の比 D'/D が一定値 (図 18 中の破線) を示し, 加工が穴底に到達した後のレーザ照射で次第に穴入口のオーバハング L が成長していることがわかる. さらに図 18(b)~(d)では, その変曲点を示す時刻付近以後, D_b/D も一定 (図中の二点鎖線) 値を示し, 外層銅箔の穴がレーザ光のマスク効果的な役割を果たしていることもわかる. またその時, テーパ角 θ も次第に増大する傾向が見られる. したがって, オーバハング L およびテーパ角 θ を小さくするためには, 穴底の内層銅箔にレーザ到達した後にできるだけ速やかに適切にレーザ光の照射を止める必要があることもわかる.

Fig. 18 Influence of irradiation time on diameter ratio and taper angle after drilling.

次に加工穴の直径を比較する基準として, 照射時間ではなく投入エネルギー (熱量) を考える. 照射時間を t_i , レーザ出力を P としたときに, 投入エネルギー E は次の式で算出する.

$$E = P \times t_i \quad (14)$$

投入エネルギーと D , D' , D_b の関係を図 19(a)~(c) に示す. 出力が非常に低い $P=25\text{W}$ の場合を除くと, 投入エネルギー E に対する傾向はどの場合も同様であることがわかる. そこで $P=25\text{W}$ を除いて比較すると, 穴底の内層銅箔に関連する D_b に比べて表面の外層銅箔に関連する D, D' は同じ投入エネルギーにおける差が大きいことがわかる. これは, D' は図 2 において外層銅箔の直下であり, レーザのエネルギーが銅箔を通して大気中に放熱されているため, 照射時間の違いの影響を受けやすいものと考えられる. 絶縁層のエポキシ樹脂 (FR-4) と銅の熱伝導

率はそれぞれ 363 W/(mK), 0.31 W/(mK)であり, 銅の方が約 1000 倍大きい. よって両面がエポキシ樹脂に接する内層銅箔より, 片面が大气に接する外層銅箔の方が放熱作用を有するためと考えられる.

(a) Copper layer diameter D (b) Insulated layer diameter D' (c) Inner layer diameter D_b Fig. 19 Influence of input energy E on drilled diameters after drilling.

そこで銅の放熱が直径に影響していることを確認するために, Large-Window 法(以下 LW 法)で同様の実験を行った. LW 法とは, 図 2 における最上部の層である外層銅箔を化学的エッチング等に穴形状に除去した後にレーザを照射する加工法である. この方法で, 絶縁層の樹脂に直接レーザを照射することができる. 図 20(a)に LW 法における投入エネルギーと直径 D' , D_b (この場合は D は存在しない) の関係を示す. これより, LW 法では異なる

(a) Entrance Diameter

(b) Ratio of entrance and bottom diameter

Fig. 20 Influence of input energy on drilled diameters after drilling (Large-window method).

る出力においても投入熱量が同じであれば、照射時間に関係なくほとんど同じ D' , D_b が得られることがわかった。また、LW 法の加工における直径 D' , D_b の比についても注目した。投入エネルギーと直径の比 D_b/D' の関係を図 20(b)に示す。図中のプロットは、25 W から 95 W までの 4 水準すべての結果を含んでいる。図より、LW 法の加工においては直径の比もおおよそ一定であることがわかった。また、LW 法では加工穴の直径、その比が投入エネルギーに大きく依存するが、Cu ダイレクト法ではレーザ出力によっても直径の大きさが変化している。したがって外層銅箔の放熱による加工穴品質への影響は無視できないレベルにあることもわかった。

3・3 2 色法を導入した熱画像に基づくモニタとその平均温度の考察

3・1 節で画素のしきい値を十分に検討して画像上の発光部の面積 A に着目する手法は穴品質の管理等に有効な手法となる可能性を示すことができた。またそれらと加工穴形状との対応関係についても 3・2 節で検討することができた。その一方で、画素の輝度を用いている限り撮影条件による影響は残り、その普遍性の確保は難しいものと考えられる。そこで輝度をそのまま用いるのではなく、2・5 節に示したように RGB の比による 2 色法を導入し、輝度でなく温度情報にして熱画像化してモニタする手法を検討する。さらに 3・1 節における知見との対応は平均温度を用いて検討する。すなわち平均温度を算出する際には、画像上の発光部分の面積とその領域に含まれる画素のそれぞれの温度の総和を用いる。BVH 加工では穴入口からすべての除去物質が噴出し、その物質の種類（本報の場合は銅、エポキシ樹脂、E ガラス）が事前に判明しておれば、それらの融点や沸点などの温度を目安にしながらモニタ技術を構築できる可能性があるものとする。

レーザ照射時間と穴入口付近の二色法に基づく予想温度 T_{GR} , T_{BG} , T_{BR} の関係を図 21 に示す。図 21 より T_{GR} , T_{BG} , T_{BR} はすべて 2300 °C 前後を示して、ほぼ等しい温度であった。一方、ガラス繊維強化プラスチックのレーザ穴あけ中の加工壁面の温度は E ガラスの沸点になることが解明されている(Tagliaferri et al., 1985)。また照射時間が長い（数百 ms 程度）場合は、樹脂の熱分解で発生したメタン等の還元性ガスと高温ガラスが反応して炭化ケイ素化し、その場合に壁面はその昇華温度である 2700~2800°C に達することも解明できている(廣垣他, 1997)。したがって噴出する飛散物の最高温度としては、基板表面の外層銅箔の沸点である 2562°C, E ガラスの沸点は 2230°C, さらに炭化ケイ素の昇華温度である 2700~2800°C が予想されるが、平均的には E ガラスの沸点に近い温度帯で変動していることがわかる。

飛散物の熱画像を図 22 に示す。図 22 より、図 5 に示される層流のポテンシャルコア領域はどの解析結果も 2300 °C 程度を示しているが、図 6(b)に示されるその周辺の乱流の混合領域の温度は解析方法によって差がみられた。これは周辺の混合領域は温度が低いいため発光量が小さく S/N 比の確保が難しいためと考えられる。そこで飛散物の輝度 h で 4 分類し、 r, g, b の分布とその校正曲線を図 23 に示す。図中の曲線は 300°C~4000°C と少し広く示してある。図 23 において輝度 h の高いプロットは校正曲線上にほぼ分布するが、輝度 h が小さいプロットは校正曲線の付近に広がり分布していることがわかる。このことから、2・5 節でも述べた様に 700°C 程度以下にまで冷却された飛散物の温度モニタの精度は低下することがわかった。

Fig. 21 Estimated temperatures derived from T_{GR} , T_{BG} and T_{BR} during laser irradiation.

Fig. 22 Thermal images derived from T_{GR} , T_{BG} , T_{BR} in laser drilling ($t = 0.3043$ ms).

Fig. 23 Relationship between calibration curve and measured RGB ratio during laser irradiation.

次にレーザ照射時間と図 22 の様にして取得した温度画像の T_{GR} 平均温度 (可視化できた飛散物の平均温度) の関係を図 24 に示す。また 2・4 節の図 10 と同様に $N=5$ の単純移動平均(SMA)を用いた。図 24 中には各部の穴径の変化も合わせて示す。繰り返しの再現性を調べるため図 24 には 3 穴加工時 (図中の試行 1~3) の結果を掲載するが、再現性良く似た傾向を示すことがわかる。また銅電極の放電加工時に 3000K 以上の銅プラズマが生じることが知られている (生島, 国枝, 2000)。図 24 の加工の極初期 (0~0.1ms) に顕著な昇温が見られるが、表面の回路銅箔が昇温・蒸発してその気体がレーザのエネルギーを吸収して銅プラズマ化した影響と考えられる。図 24(a) の 75W では約 1.6 ms, 図 24(b) の 95 W では約 1.1 ms で平均温度が 100~200°C 程度低下している。一方、穴底の内層銅箔を貫通するまでに必要な照射時間が 75 W では約 1.7 ms, 95 W では約 1.2 ms であった。したがって内層銅箔を貫通するとき、その潜熱等や内層銅箔の直下の樹脂やガラス繊維への伝熱等の影響で飛散物の平均温度が低下するものと考えられる。例えば、図 24 中の穴底直径 D_b に着目すると、それらの時間の直前で増加率が僅かに低下しており潜熱の影響を示唆していることもわかる。また内層銅箔の貫通穴のまわりは噴流化しており、またまわりにはガラスなどのレーザ吸収物質も多く存在しており、表面の回路銅箔に比べ銅蒸気はほとんどプラズマ化されることなく排出されているものと考えられる。したがって単なる輝度 I_v の変化ではなく、温度に換算しての変化をモニタできることで従来の画像処理 (廣垣他, 2016) に比べてより普遍的な管理手法につながる可能性があることがわかった。

図 24 と図 15(c)(d)を比較すると、平均温度は概略として画像上の発光部の面積率の逆数との相関が高い関係にあることがわかる。しかしながら撮影時のカメラとプリント基板の間の距離やカメラの倍率等の撮影条件を変化させると発光部の面積率が変化する一方で、平均温度は撮影条件を変化させても一定であった。以上の結果は、高速度ビデオの撮影モニタに 2 色法を導入することで、物理量である温度としての可視化の機能を付加するだけでなく、撮影条件が変化する場合にも普遍的なモニタを具現化できることを示しているものと考えられる。

Fig. 24 Relationship between average temperature and drilled diameter during laser irradiation.

図 25(a)(b)に $P=75\text{ W}$ の($t=0.74\text{ ms}$ および 2.48 ms)場合, 図 25(c)(d)に $P=95\text{ W}$ の($t=0.52\text{ ms}$ および 2.26 ms)場合の飛散物の元画像と熱画像を示す. 図 25(a)(c)は穴底となる内層銅箔の貫通前, 図 25(b)(d)は貫通後の画像である. 図 25(a)(b)の温度分布を比較すると内層銅箔を貫通した図 25(b)で 2000°C 以上を示すポテンシャルコア領域が長くなり, さらにその周辺の $1000\sim 2000^{\circ}\text{C}$ を示す混合領域も拡大している様子がわかる. 自由噴流において, オリフィスノズルから噴出された噴流の直後にある大きさの容量(共鳴室)を設け, その一端にもう一つのオリフィスを設置すると, 共鳴室で渦が生じ, それが二つ目のオリフィスからの渦と干渉した共鳴噴流となる. その場

Fig. 25 Comparison between original image and thermal image at before and after penetrating inner copper foil layer.

Fig. 26 Schematic diagram of processing variation from a view of cross section at penetrating inner copper foil layer.

合に中心流速の増加と噴流の混合域での拡散が顕著化することが示されている(社河内他, 2012). ここでこの現象について検討する. 図 26(a)に示すように, 内層銅箔を貫通前にその直下の樹脂が加熱され熱分解して気化し高圧の部分が生じる. その後その内層銅箔にレーザーで穴が貫通して激しくその飛散物が噴出する. その場合, 図 26(b)に示すように外層銅箔が二つ目のオリフィスの役目となり, 内層銅箔との間の空間が共鳴室となる. その結果, 中心流速の増大および噴流の混合領域の拡散が顕著になるものと考えられる. これらの自由噴流の特徴的な現象の変化に対しても, 高速度ビデオの撮影モニタに 2 色法を導入すること明確に検出することが可能であることがわかる.

4. 結 言

電子機器などに使用されている多層プリント基板の製造工程において, ビルドアップ工法の Cu ダイレクト・ブラインドバイアホール加工の工程を対象にして, 除去プロセス中に加工穴入口から噴出する飛散物を高速度カメラで撮影し, その動画データを解析する手法に取り組み, 次の結果を得た.

- (1) 噴出する飛散現象は自由噴流でモデル化でき, 輝度の時間変化が小さいポテンシャルコア領域は連続画像の差分処理で抽出が可能である.
- (2) レーザバイアホール加工において, 外層銅箔の有無は単にマスク効果だけでなくその放熱が加工穴の断面形状などの品質に影響をおよぼすことがわかった.
- (3) 画像に対し適切なしきい値以上の輝度の画素の面積の時間変化は, 加工進行に伴う穴形状の変化等の品質管理の目安に活用でき, さらに外層銅箔の有無による放熱の影響についても評価が可能である.
- (4) 高速度カメラのビデオ画像のカラー情報に着目して 2 色法を適用することで, 画素の情報を輝度でなく物理量である温度として可視化が可能となり, 撮影条件が変化する場合にも対象物の沸点のような固有の基準を用いた普遍的なモニタを具現化できる.
- (5) 2 色法を適用した高速度カメラビデオのモニタで, 加工進行に伴う穴形状の変化に起因したポテンシャルコア領域の変化だけでなく, その周辺の混合域の特徴的な変化も検出が可能であることが判明し, 今後の製造現場への応用展開が十分に期待できる.

文 献

- 榎本啓士, 澤崎駿佑, 野末浩隆, 岩船尚樹, 稗田登, プタン拡散火炎に投入された微小液滴列による輝炎の光学温度計測, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 827 (2015), DOI:10.1299/transjsme. 14-00589.
- 廣垣俊樹, 青山栄一, 片山傳生, 近藤久弥, 皆木龍, 井上久弘, 有限要素法モデルによる多層プリント基板の回路接続用小径止まり穴の品質評価 (レーザー加工時に起こる穴底銅箔の熱履歴の影響), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 69, No. 678(2003), pp. 509-515.
- 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 恩地駿, 五百住宗高, 高放熱性プリント基板の Cu ダイレクトレーザー加工における高速度カメラによるモニタリングに基づく止まり穴品質の制御方法, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 836(2016), DOI:10.1299/transjsme. 15-00491.
- 廣垣俊樹, 青山栄一, 井上久弘, 片山傳生, プリント基板用 GFRP のレーザー加工面の品質に関する研究 (穴あけ加工時の被削材内部の温度分布と損傷), 材料, Vol. 46, No. 11(1997), pp. 1329-1334.
- 池田光男, 色彩工学の基礎, 朝倉書店(1980), p.74.
- 生島聡之, 国枝正典, EDM アークプラズマ内温度分布の分光測定, 精密工学会誌, Vol.66, No.3(2000), pp.399-403.
- 岩田利枝, 室内の光環境・視環境, 室内環境, Vol.11, No.2 (2008), pp.117-123.
- 鎌田祐一, 平沢太郎, 中村祐二, 近赤外 2 色法による中高温域温度計測の評価, 可視化情報学会論文集, Vol.29, No.9 (2009), pp.35-41.
- 片岡卓, 極薄銅箔を使った新しい工法へのチャレンジ, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.2, No.4 (2001), pp. 108-112.
- 片山正彦, 吉原佐知雄, 清野正三, 君塚亮一, ダイレクトレーザービア工程において発生する銅オーバーハングの磁気研磨法による新規除去技術の検討, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.17, No.4 (2014), pp.292-296.
- Kanki, K., Iozumi, M., Hirogaki, T., Aoyama, E. and Ogawa, K., Pulse laser irradiation control method for blind via-hole drilling of printed wiring boards based on high-speed camera monitoring, Materials Science Forum, Vol. 874 (2016), pp. 285-290.

- 岡本恭平, 伊藤健治, 村木健志, CO₂ レーザによる銅箔貫通穴あけ加工, 表面技術, Vol.62, No.9 (2011), pp. 440-442.
- 社河内敏彦, 噴流工学 (基礎と応用), 森北出版(2013), pp.3-55.
- 社河内敏彦, 鬼頭みずき, 辻本公一, 安藤俊剛, 共鳴噴流の流動特性と切欠きノズルによる制御, 日本機械学会
論文集 B 編, Vol.79, No.798(2012), pp. 126-139.
- Tagliaferri, V., Ilio, A. D. and Visconti, I. C., Laser cutting of fibre-reinforced polyesters, Composites, Vol.16, No.4
(1985), pp.317-325.
- 和田哲義, 溶射診断技術—溶射粒子温度・速度および皮膜応力のその場測定, 溶接学会誌, Vol.82, No.8 (2013), pp.
609-613.

References

- Enomoto, H., Sawasaki, S., Nozue, H., Iwafune, N. and Hieda, N., Optical temperature measurement of small droplet array
luminous flame in butane diffusion flame, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.827 (2015),
DOI:10.1299/transjsme.14-00589.
- Hirogaki, T., Aoyama, E., Katayama, T., Kondou, H., Ninagi, R. and Inoue, H., Quality estimation of small diameter via holes
for circuit connection on multi-layer printed wiring boards using F. E. M. : Influence of heat input by laser drilling on
copper foil at hole bottom, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.69, No.678 (2003),
pp.509-515 (in Japanese).
- Hirogaki, T., Aoyama, E., Ogawa, K., Onchi S. And Iozumi, M., Quality control method of blind via hole based on monitoring
Cu direct laser processing in high heat radiation printed circuit board with a high speed camera, Transactions of the
JSME (in Japanese), Vol.82, No.836 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00491.
- Hirogaki, T., Aoyama, E., Inoue, H. and Katayama, T., A study on surface quality in laser machining of GFRP for printed
wiring board (Temperature and damage at workpiece in drilling), Journal of Society of Materials Science Japan, Vol.
46, No. 11(1997), pp. 1329-1334 (in Japanese).
- Ikeda, M., Basic theory of color engineering, Asakura Publishing Co., Ltd (1980), p.74 (in Japanese).
- Iwata, T., Indoor light environment and visual environment, Journal of Society of Indoor Environment, Vol.11, No.2 (2008),
pp.117-123 (in Japanese).
- Kataoka, T., Challenge on new process using ultra thin copper, Journal of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.2,
No.4 (2001), pp. 108-112 (in Japanese).
- Katayama, M., Yoshihara, S., Seino, S. and Kimizuka, R., Study of new removal technique by use of magnetic polishing
method for copper overhang generated in the direct laser via process, Journal of The Japan Institute of Electronics
Packaging, Vol.17, No.4 (2014), pp.292-296 (in Japanese).
- Kamata, Y., Hirasawa, T. and Nakamura, Y., Evaluation of measurement in mid-high temperature range by near infrared
two-color imaging pyrometry, Journal of Visualization, Vol.29, No.9 (2009), pp.35-41 (in Japanese).
- Kanki, K., Iozumi, M., Hirogaki, T., Aoyama, E. and Ogawa, K., Pulse laser irradiation control method for blind via-hole
drilling of printed wiring boards based on high-speed camera monitoring, Materials Science Forum, Vol. 874 (2016), pp.
285-290.
- Ojima, S. and Kunieda, M., Spectroscopic measurement of temperature distribution in EDM arc plasma, Journal of Japan
Society for Precision Engineering, Vol.66, No.3(2000), pp.399-403 (in Japanese).
- Okamoto, K., Itou, K. and Muraki, T., Through copper direct drilling process by CO₂ laser, Journal of The Surface Finishing
Society of Japan, Vol.62, No.9 (2011), pp. 440-442 (in Japanese).
- Shakouchi, T., Jet flow engineering (Fundamentals and application), Morikita press (2013), pp.3-55 (in Japanese).
- Shakouchi, T., Kito, M., Tsujimoto, K. and Ando, T., Jet flow form resonance nozzle and flow control by noted nozzle,
Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.79, No.798 (2013), pp.126-139 (in Japanese).
- Tagliaferri, V., Ilio, A. D. and Visconti, I. C., Laser cutting of fibre-reinforced polyesters, Composites, Vol.16, No.4
(1985), pp.317-325.
- Wada, T., Thermal spray diagnostics-particle temperature/velocity and coating stress in-situ measurement, Journal of the
Japan Welding Society, Vol.82, No.8 (2013), pp. 609-613 (in Japanese).