プリント基板における Cu ダイレクトバイアホールレーザ加工に
関する研究*

(高速度カメラ画像に基づく除去プロセスの可視化)

廣 垣 俊 樹^{*1}, 青 山 栄 一^{*1}
小 川 圭 二^{*2}, 鮎 澤 司^{*3}Direct Laser Drilling in Copper Clad Printed Wiring Boards
(Visualization of Removal Process Based on High-Speed Camera Images)Toshiki HIROGAKI^{*4}, Eiichi AOYAMA,
Keiji OGAWA and Tsukasa AYUZAWA^{*4} Department of Mechanical Engineering, Doshisha University,
1-3 Tataramiyakodani, Kyoutanabe-shi, Kyoto, 610-0394 Japan

Micro-via drilling technology using a laser has become the dominant method for drilling blind via-holes (BVHs) of multi-layer Printed Wiring Boards (PWBs). Cu-direct laser drilling has attracted attention as a new method. However, the Cu-direct drilling is problematic in that it produces a copper overhang as a result of copper and resin, which have different decomposition points, being melted simultaneously. In addition, the state of PWB surface after the laser drilling is very important quality. Therefore, first, we observed the appearance of a removal which was not clear up to now because it is a momentary process. We elucidated the removal process using a high-speed camera. Second, we examined the influence that the build-up layer gave removal process. Finally, we produced the prototype PWBs which was aimed to reduce the overhang length and sputter deposition, and the effect was demonstrated. As results, the removal process in Cu-direct drilling was visualized and revealed. It was found that sputter deposition on the PWB surface after drilling increased with inorganic substance in build-up layer. Using the prototype PWBs, we achieved the suppression of overhang length and sputter deposition. PWBs which was aimed to reduce the overhang length and sputter deposition, and the effect was demonstrated.

Key Words: CO₂ Laser, Cu-Direct Drilling, High-Speed Camera, Overhang, Printed Wiring Boards

1. 緒 言

モバイル機器に代表される製品の小型化に対応するために、それらに内蔵されるプリント基板の電気回路は多層構造になってきている^①。そのため、層間の電気接続用マイクロ止まり穴(ブラインドバイアホール:以下 BVH と称す)の形成が必要となり、炭酸ガスレーザを用いた手法が一般的に用いられている。しかし、電気回路用銅箔は炭酸ガスレーザに対して吸収率が数%と極めて低いために、外層銅箔を予めエッチング除去した後で絶縁層樹脂にレーザを照射することで BVH を形成する手法(ラージウィンド加工法)が採用されてきた。しかし、近年の銅箔薄化技術および表面処理による吸収率向上技術により、外層銅箔と絶縁層を同時に加工する Cu ダイレクト加工法が提案され、その実用が期待されている^②。Cu ダイレクト加工は、内層回路パターン基準で穴あけするので穴位置精度がよい上に、外層銅箔をエッチング除去する工程

が不要になる。しかし、レーザ加工性の大きく異なる銅(電気回路)と樹脂(絶縁層)を同時に加工するため、外層銅箔が穴内壁から突出した状態で残存するオーバーハングという Cu ダイレクト加工特有の課題が顕在化した^③。しかし、Cu ダイレクト加工に関する研究報告^④は極めて少ないのが現状である。これまで著者らは、炭酸ガスレーザ加工用に開発された AFRP (アラミド繊維強化プラスチック)を絶縁層に用いた基板を対象に、外層銅箔表面性状が加工穴品質に及ぼす影響を明らかにした^⑤。また、オーバーハング生成機構を解明し、絶縁層に無機フィラーを添加した基板を試作してオーバーハングの抑制効果を実証した^⑥。しかし、AFRP は高価なため近年その使用量が激減しており、GFRP (ガラス繊維強化プラスチック)を絶縁層とした基板の使用が増えてきている。また加工穴品質として、オーバーハングの他に加工後の基板表面付着物も挙げられるが、未だこれに関する研究には至っていなかった。そこで本報では、マイクロ穴レーザ加工の様子を高速度カメラで観測して、得られた画像を解析することで材料除去および飛散プロセスを解明し、基板表面付着物を低減するための方策を示した。

* 原稿受付 2010 年 5 月 17 日。

^{*1} 正員, 同志社大学理工学部(☎ 610-0394 京田辺市多々羅町谷 1-3)。^{*2} 正員, 滋賀県立大学工学部(☎ 522-8533 彦根市八坂町 2500)。^{*3} 同志社大学大学院工学研究科。

E-mail: thirogak@mail.doshisha.ac.jp

Fig.1 Measurement points as BVH quality

2. 実験方法

プリント基板材料として多用されているGFRP（ガラス繊維平織布エポキシ樹脂積層板，厚さ0.8mm，積層数4，ガラス含有率42vol%）をコア基板とし，厚さ35 μ mの内層回路用銅箔，厚さ0.2mmの絶縁層，厚さ9 μ mの外層回路用銅箔を積層した基板を加工試料として用いた。絶縁層はコア基板と同様のGFRP（積層数1）を使用した。外層銅箔にはレーザ吸収率を向上させるために黒化処理を施した⁶⁾。

使用した加工機は米国シンラッド製の炭酸ガスレーザ加工機48-5-28W（平均出力100W，シングルモードTEM₀₀）である。試料上面が焦点（レーザスポット径 ϕ 0.28mm）となるようにして，BVH形成確率が100%となるレーザ照射時間範囲⁶⁾で加工実験を行った。なお，アシストガスとして窒素を用いた。また，加工の様子撮影にはナックテクノロジー製の高速カメラMEMRECAMEX-RX-6（最高210000fps）を使用した。

加工穴品質として，図1に示す外層銅箔，絶縁層それぞれにおける穴半径 R_1 ， R_2 を測定した。また， R_2 と R_1 の差をオーバーハング長さ L と定義して算出した。なお，これらは10穴加工時の平均値を測定値とした。

3. GFRP 基板の加工穴品質

GFRP基板はAFRP基板に比べてオーバーハングが長くなるだけでなく，ガラス繊維が穴壁面から突出して残り，加工穴品質が悪くなる傾向にある⁷⁾。既報⁸⁾によりオーバーハング長さを抑制するためには，絶縁層材の熱伝導率を高くするためにフィラーを添加することが有効であることが判明している⁸⁾。そこで，絶縁層のエポキシ樹脂にアルミナ(Al_2O_3)フィラーを添加した基板（以下GFRP+ Al_2O_3 基板と称す）を用いた。絶縁層材の構成割合はエポキシ樹脂20vol%，ガラスクロス50vol%，アルミナ30vol%である。

3・1 アルミナフィラー添加によるオーバーハング抑制効果 既報⁸⁾と同様にFEMによる熱伝導解析により，GFRP基板のオーバーハング長さの予測を行った。解析に用いた銅，エポキシ樹脂，ガラスクロスお

Table 1 Thermal properties of copper, epoxy, glass and Al_2O_3

	Copper	Epoxy	Glass	Al_2O_3
Mass density kg/m^3	8680	1200	2540	3815
Thermal conductivity $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$	371	0.669	1.04	6.13
Specific heat $\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$	441	1.05	1.38	1270
Melting point K	1360	435	1113	2327

よびアルミナの熱物性値⁸⁾を表1に示す。エポキシ樹脂とアルミナからなる部分の物性値は体積含有率から複合則によって求めた。そして解析を行った後，外層銅箔と絶縁層との境界部において，GFRP基板は絶縁層がエポキシ樹脂の分解温度（723K）以上，GFRP+ Al_2O_3 基板に対しては複合則より求めたエポキシ樹脂とアルミナの混合物の分解温度（1685K）以上となる領域が除去されるものとして，穴中心軸（光軸）からその領域の端点までの距離を R_2 予測値として求め， R_1 予測値との差を L 予測値とした。なお，熱物性値は表1の値で一定とし，層間の界面熱抵抗は無視できるものとした。解析結果を図2に示す。アルミナフィラー添加をすることで，オーバーハング長さが低減されることが予想される。図3に照射時間とオーバーハング長さの関係を調べた実験結果を示す。アルミナフィラー添加によってオーバーハング長さは低減することがわかる。この傾向は，図2の解析結果と定性的に一致している。なお，GFRP単体では実験データと解析データの偏差が非常に大きくなっている。後述の加工穴断面写真からもわかるように大きなオーバーハングが発生する場合，表面張力により球状に変形する傾向にあり，このため実験値が小さく見積もられたためと考えられる。またレーザを50ms間照射した後の基板に銅めっきを施して，その加工穴断面を確認した結果を図4に示す。図4(a)のGFRP基板の穴壁面には，ガラス繊維の残存による段差が生じており，その結果めっきの析出不良が発生していることがわかる。一方で図4(b)のGFRP+ Al_2O_3 基板の穴壁面には段差がほとんどなく，良好な穴品質および銅めっきが得られている。したがって，絶縁層材にアルミナフィラーを添加することで，絶縁層の熱伝導率が高くなり，その加工量が抑制されてオーバーハング長さが低減したことがわかる。本結果はAFRP基板の場合と同様である。

3・2 基板表面付着物の評価 多層プリント基板の製造における回路形成を考慮すると，オーバーハングだけではなく，加工後の基板表面状態も非常に重

Fig2 Irradiation time vs. overhang length (Analysis)

Fig3 Irradiation time vs. overhang length (Experiment)

Fig4 Drilled hole after plating

Fig5 SEM micrograph of surface around drilled hole

要な品質に挙げられる。そこでレーザ加工後の基板表面状態を SEM 観察した。図 5 に照射時間 5.0ms のときの GFRP 基板の表面を示す。加工穴周辺には、 $\phi 10 \sim 15 \mu\text{m}$ 程度の粒子状の付着物が多く存在していることがわかる。用いた GFRP のガラス繊維径が約 $10 \mu\text{m}$ であることから、これがレーザにより熔融して飛散し、表面張力で球状化したものが付着したと考えられる。なお、この付着物は穴に近いほど多く存在していることもわかる。そこで、GFRP 基板および GFRP+ Al_2O_3 基板の穴周辺 SEM 像において、付着物が占める面積の総和を S と定義してレーザ照射時間との関係を調査し

Fig6 Amount of incrustation

Fig7 The photograph of the laser drilling (GFRP)

Fig8 Image binarization (GFRP)

た。結果を図 6 に示す。いずれの基板も照射時間が長くなると、付着物の量が多くなっている。また GFRP 基板に比べて GFRP+ Al_2O_3 基板の方が、より多くの付着物が存在することがわかる。さらに、その差は両基板の無機物の体積含有率 (GFRP 基板は 42vol%, GFRP+ Al_2O_3 基板は 80vol%) とほぼ一致している。AFRP 基板の場合にはレーザ加工後の基板表面に付着物が確認できなかったことから、本現象はガラス繊維のような無機物を含む基板特有の現象であると考えられる。

4. 高速度カメラによる加工の撮影

4.1 除去プロセスの可視化 基板表面の付着物はレーザ加工における材料の飛び散りによるものと考えられているが、その実態については明確にされていない。そこで、高速度カメラを用いてレーザ照射による材料の除去プロセスを観測した。撮影時のフレームレートは 30000fps とした。図 7 に GFRP 基板にレーザを 1.0ms 照射したときの撮影結果を示す。レーザ照射直後 0.1ms にレーザ照射箇所が発光している様子が確認できる。そして、0.2ms 以降に照射箇所から強い光が噴出している様子が確認できる。

Fig.9 The ratio of the light volume (GFRP)

4・2 噴出光量の変化 加工時に噴出する光の噴出量を定量化するために、図 8 に示すように各時刻における高速度カメラ画像を二階調化 (256 階調のグレースケール画像に対してしきい値 128 とした) した後、画像内の全てのピクセル数を N_0 、光の噴出に該当するピクセル数を N として、画像内の噴出光量の比率 N/N_0 を調べた結果を図 9 に示す。比率 N/N_0 が大きいほど多くの光を発していることになる。図より、 N/N_0 は照射後 0.05ms で極大となり、0.15ms までに減少している。そして 0.15ms 以降に急激に増加した後、照射時間である 1.0ms まではほぼ一定であり、1.0ms 以降は急激に減少することがわかる。この結果から、照射開始から 0.15ms までと 0.15ms 以降では除去プロセスが異なることが推測される。そこで時刻 0.15ms での現象を確かめるために照射時間を 0.15ms とすることを考えたが、実験に使用した機器の仕様上不可能であったため、可能な限り短い照射時間 0.2ms にて実験を行ったところ、この照射時間では外層銅箔が加工されて絶縁層材料が、わずかに加工されることがわかった。つまり、照射開始から 0.15ms までは、外層銅箔が加工され、それにより光が発生したものと考えられる。そして、0.15ms 以降は絶縁層にレーザが照射されて加工が進行していくものと考えられる。

4・3 絶縁層材の加工 絶縁層材料は有機物であるエポキシ樹脂と無機物であるガラスクロスで構成されており、これらを同時に加工しているため、現象が非常に複雑である。そこで、エポキシ樹脂のみ、ガラスクロスのための試料を用いてレーザ加工の様子を高速度カメラ撮影して、除去プロセスを調査した。試料の厚さはいずれも使用しているプリント基板の絶縁層材料と同じ 0.2mm とし、実際の加工穴は止まり穴であるので、これを再現するために各材料のレーザ照射面の裏側に銅箔を貼り付けた。図 10 に実験結果を示す。なお、時刻 0ms の写真における白の破線は、用いた試料の端面を示している (後出の図 11、図 12、そして図 15 も同様である)。エポキシ樹脂のみに照射した

Fig.10 The photograph of the laser drilling (Epoxy, Glass)

Fig.11 The photograph of the laser drilling
(GFRP non outer copper foil)

場合は、ほとんど発光せず、わずかな噴霧が確認されるだけである (図 10 (a))。一方ガラスクロスのみ照射した場合には光の噴出が確認できる (図 10 (b))。この違いはレーザ加工をしている材料が無機物か有機物かによるものと考えられる。一般的にエポキシ樹脂は入熱すると比較的低い温度で熱分解して気体化する。また用いたレーザのモードが TEM_0 であるため穴中心軸 (光軸) でエネルギー密度が最大となる。したがって、中心軸でエポキシ樹脂の蒸発圧が最大となると考えられ、その結果、気体化した樹脂が加工穴壁面に沿って穴の外へ噴出すると考えられる。一方、無機物であるガラスは軟化点が 1119K であり蒸発温度は 2573K と非常に高く、レーザを照射すると高温状態となり液状化して存在する。そのため発光はガラス繊維によるものと考えられる。次に、上記で使用したエポキシ樹脂とガラスクロスからなる GFRP にレーザを照射したときの結果を図 11 に示す。ガラスクロスの方に比べて光が高く上がっていることがわかる。これは気体化したエポキシ樹脂が穴の外へ噴出する際にガラスを吹き飛

Fig.12 The photograph of the laser drilling

ばすためと考えられる。

以上より、レーザ加工における除去プロセスは、まず外層銅箔が溶融し加工される。そして絶縁層にレーザが照射されて絶縁層材の温度が上昇する。このときエポキシ樹脂は低い温度で熱分解して気体化するが、ガラスは高温のまま存在する。このとき、気体化したエポキシ樹脂が穴の外へ噴出する際に溶融したガラスを吹き飛ばして穴が形成される。照射時間が長くなると、除去体積が減っていくため、光の噴出は弱くなっていく。そして、吹き飛ばされたガラスが基板表面に付着するものと考えられる。

4・4 絶縁層材質が基板付着物に及ぼす影響 除去プロセスより基板表面の付着物はエポキシ樹脂によって吹き飛ばされたガラスであると考えられる。ここで図6の結果より、GFRP+Al₂O₃基板表面には多くの付着物が確認された。GFRP+Al₂O₃基板はフィラーとしてアルミナを添加したものであるが、添加によって基板中のエポキシ樹脂の量が減少し、無機物が増えている。そのため、絶縁層材料中のエポキシ樹脂と無機物の割合によって除去による基板表面への付着の様子が異なると考えられる。そこで比較材料として AFRP 基板を使用した。レーザ照射時間を 1.0ms としたときの撮影結果を図 12 に示す。また、画像を基に二階調化した後の噴出光量の比率 N/N_0 について GFRP 基板および GFRP+Al₂O₃ 基板と比較した結果を図 13 に示す。GFRP 基板に比べて GFRP+Al₂O₃ 基板の場合は粒状に多く噴出していることがわかる。これはアルミナフィラ

Fig.13 The ratio of the light volume

Fig.14 Amount of removal inorganic volume

一であると考えられる。ここで、レーザ加工後の穴径を測定し、加工時の除去体積を求めた。同一レーザ照射条件では GFRP 基板の方が除去体積は多い。しかし基板中に含まれている無機物と有機物の割合が異なるので、無機物の除去体積を含有率をもとに求めた結果を図 14 に示す。図より、除去された無機物の量は両基板ともほとんど同じであることがわかる。それにもかかわらず、図 6 に示すように GFRP+Al₂O₃ 基板は表面の付着量が多いことがわかる。アルミナの融点はガラスに比べて高いため、レーザを照射してもほとんどが固体のままであると考えられる。そのため、無機物の除去体積は同じにも関わらず、基板表面の付着量に違いが出たものと考えられる。一方、AFRP 基板の場合は、粒状の噴出はなく、わずかな噴霧が確認できた。AFRP 基板は強化繊維がアラミドであり、アラミドはアミド結合によって多数のモノマーが結合してできたポリマー（有機物）である。そのため、エポキシ樹脂と同様に、加工時に気体化してしまうために粒状の光の噴出が見られないと考えられる。以上より、絶縁層材に含まれる無機物の量が多くなると、除去時に多くの飛び散りが生じることがわかった。

5. 水酸化アルミフィラー添加による加工穴品質向上

本章では、オーバーハング長さの低減、基板表面付着量の減少の両立を目指す。前章より、気体化した

エポキシ樹脂が穴外へ出ていく際、高温の無機物を吹き飛ばして穴が形成され、飛び散った無機物が基板表面に付着することが明らかとなった。そこで、 200°C 以上で結晶より水蒸気を放出し大きな吸熱を示す水酸化アルミ($\text{Al}(\text{OH})_3$)の特徴に着目した。この水酸化アルミをフィラーとして絶縁層材に添加することで、エポキシ樹脂の温度上昇を抑えられ加工量が減ることが考えられる。そのため無機物の噴出量が抑制され、基板表面の付着量の低減、さらにはオーバーハング長さの抑制が期待できる。そこで、水酸化アルミをフィラーとして絶縁層材に添加した基板（以下 $\text{GFRP}+\text{Al}(\text{OH})_3$ 基板と称す）を試作した。構成割合はエポキシ樹脂 42vol%, ガラスクロス 42vol%, 水酸化アルミ 16vol% である。水酸化アルミの主な物性値⁹⁾は、密度 2420kg/m^3 、熱伝導率 $151\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、比熱 $1210\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ である。

5・1 噴出の様子と基板表面付着物の評価 照射時間 10ms としたときの加工の様子を高速度カメラ撮影した結果を図 15 に示す。また画像を基に、二階調化した後の噴出光量の比率 N/N_0 を GFRP 基板および $\text{GFRP}+\text{Al}_2\text{O}_3$ 基板と比較した結果を図 16 に示す。両図を見ると、無機フィラーを添加しているにもかかわらず、アルミナフィラーを添加した基板に比べ噴出量が少なく、 GFRP 基板とほとんど同じであることがわかる。また、図 17 に加工穴周辺の基板表面付着物の量 S の測定結果を示す。図より水酸化アルミフィラーを加えることで基板表面の付着量はアルミナフィラーを加えたものより低減できていることがわかる。

5・2 加工穴径およびオーバーハング長さ 3・1 節と同じ解析手法を用いて、 $\text{GFRP}+\text{Al}(\text{OH})_3$ 基板のオーバーハング長さ抑制効果を調べた。解析モデルは前章のモデルにおいて、エポキシ樹脂とアルミナフィラーが混在した部位をエポキシ樹脂と水酸化アルミが混在したものとし、各材料の厚さはそれぞれの体積比より求めた。また、エポキシ樹脂と水酸化アルミからなる部分の物性値は体積含有率から複合則によって求めた。水酸化アルミは 200°C 以上で結晶より水蒸気を放出し、式(1)のように酸化アルミ、すなわちアルミナに変化する。よって、レーザ加工ではアルミナフィラー入りと非常に似た傾向がみられる。

そこで、解析を行った後、外層銅箔と絶縁層との境界部において、 $\text{GFRP}+\text{Al}(\text{OH})_3$ 基板はエポキシ樹脂と酸化アルミの混合物の分解温度(1685K)以上となる領域が除去されるものとして、 L 予測値を求めた。その結果を図 18 に示す。

Fig.15 The photograph of the laser drilling ($\text{GFRP}+\text{Al}(\text{OH})_3$)

Fig.16 The ratio of the light volume

Fig.17 Amount of incrustation

水酸化アルミフィラーを添加することでも、オーバーハングは抑制されることが予想される。実際に基板にレーザを照射してオーバーハング長さを求めた。結果を図 19 に示す。 GFRP に水酸化アルミフィラーを添加しても、 $\text{GFRP}+\text{Al}_2\text{O}_3$ 基板と同程度にオーバーハング長さが抑制できていることがわかる。この傾向は解析結果と一致している。次に、レーザ照射時間 5.0ms の基板に銅めっきを施して、その加工穴断面を確認した。結果を図 20 に示す。この図からもオーバーハング長さが低減されていることが確認でき、さらには穴壁面の段差もなく良質な加工穴ができていることもわかる。

以上の結果より、絶縁層材料に水酸化アルミフィラーを添加することで、基板表面の付着物の量を抑制できるだけでなく、オーバーハング長さの抑制や壁面形状の向上ができることが明らかとなった。

Fig.18 Irradiation time vs. overhang length (Analysis)

Fig.19 Irradiation time vs. overhang length (Experiment)

Fig.20 Drilled hole after plating (GFRP+Al(OH)₃)

6. 結 言

多層プリント基板の Cu ダイレクト加工を対象にして、オーバーハングの生成機構と絶縁層材がオーバーハング長さに及ぼす影響、さらには加工時の材料の飛び散りについて高速度カメラを用いて考察した結果、以下の結言が得られた。

- (1) レーザ加工の除去プロセスは、まず外層銅箔が溶解し加工される。そして絶縁層材にレーザが照射されて絶縁層の温度が上昇する。このときエポキシ樹脂は低い温度で熱分解して気体化する、一方でガラスは高温のまま存在し、気体化したエポキシ樹脂が穴の外へ噴出する際にガラスを吹き飛ばして穴が形成される。
- (2) 絶縁層材料に含まれる無機物の割合が多い場合は、飛び散り量が多くなる。このとき、基板中の無機

物の含有量にほぼ比例して穴周辺に残る付着物の量が増大する。

- (3) 水酸化アルミを絶縁層材に添加することで、加工時の熱による脱水反応により、アルミナフィラー添加のときに近いオーバーハング長さの低減効果がみられ、加工後の基板表面付着物の量も減らすことができる。

謝 辞

本研究の一部には文部科学省・科学研究費補助金(基盤研究 C19560128)を用いました。さらに、文部科学省・私立大学研究高度化推進事業「先進複合材料の開発とその応用—先端複合材料技術による自動車開発—(同志社大学)」の支援を受けました。また、本研究を遂行するにあたり、新神戸電機株式会社から貴重な御助言及び実験材料を、日立化成エレクトロニクス株式会社から黒化処理液を提供して頂きました。記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- (1) L.W.Burgess, Blind microvia technology by laser, *National Electronic Packaging and Production Conference Proceedings of the Technical Program*, No.3(1999), pp.1765-1772.
- (2) M.Owen, E.Roelants, Van Puymbroeck J., Laser drilling of blind holes in FR4/glass, *Circuit World*, Vol.24, No.1(1997), pp.45-49.
- (3) Arai, K. Yamamoto, K. Muramatsu, K. Kita, Y., PWB production technology -PWB production state of art trend judging from history- new CO₂-Cu direct processing method, *Japan Institute of Electronics Packaging*, Vol.17, No.6(2001), pp.38-43.
- (4) Hirogaki, T. Aoyama, E. Ogawa, K. Minaki, R. Murakami, T. Doi, N., Evaluation of Blind Via Hole Quality on Multi-Layer Printed Wiring Boards by Cu Direct Laser Drilling, *Journal of the Society of Materials Science*, Vol. 55, No.3 (2006), pp. 335-340.
- (5) Hirogaki, T. Aoyama, E. Ogawa, K. Matsutani, S. Ayuzawa, T., Direct Laser Drilling in Copper Clad Printed Wiring Boards, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 74, No.747 (2008), pp. 1411-1417.
- (6) Hirogaki, T. Aoyama, E. Ogawa, K. Matsutani, S. Ayuzawa, T., Direct Laser Drilling in Copper Clad Printed Wiring Boards, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No.759 (2009), pp. 3082-3088.
- (7) Hirogaki, T. Aoyama, E. Inoue, H. Ogawa, K. Nobe, H. Katayama, T. Blind Via Hole Drilling for Multi-Layers Printed Wiring Board Using Laser Beam : Comparison between Aramid and Glass Fiber Reinforced PWB, *Journal of the Society of Materials Science*, Vol. 48, No.5 (1999), pp. 467-472.
- (8) The Japan Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Engineering Data, (1997), pp.314-321.
- (9) HIGILITE catalog, Showa Denko K.K., (2009), pp.1-2.