「材料」(Journal of the Society of Materials Science, Japan), Vol. 55, No. 3, pp. 335-340, Mar. 2006
論　文

炭酸ガスレーザによるプリント基板の Cu ダイレクトバイアホール加工の穴品質評価†

廣垣俊樹*　青山栄一*　小川圭二**
皆木　龍***　村上俊樹****　土井信幸****

Evaluation of Blind Via Hole Quality on Multi-Layer Printed Wiring Boards by Cu Direct Laser Drilling

by

Toshiki Hirogaki*, Eiichi Aoyama*, Keiji Ogawa**,
Ryu Minagi***, Toshiki Murakami**** and Nobuyuki Doi****

In the current manufacture of multi-layer printed wiring boards (PWBs), the method frequently used is to laminate the core with insulating resin as build-up layers. Then, micro-via drilling technology using laser has become the dominant method of drilling smaller blind via holes of build-up layer. Cu direct laser drilling attracts attention to a new method in this field. However, there is no reports dealing with Cu direct laser drilling of PWBs. The purpose of the present report is to research the feature of Cu direct laser drilling and establish the method in order to improve hole quality. Following conclusions were obtained : (1) The technique using the infrared thermography was proposed in order to examine the laser absorptance of the surface copper foil. (2) The method of mixing fillers in the build-up layer was effective to improve hole quality by reducing the difference of the laser processing threshold between the copper foil and the build-up layer. (3) The technique was established to estimate the overusing FEM analysis.

Key words : Cu direct laser drilling, Over hang, Thermography, Absorptance, Filler, Multi-layer printed wiring boards

1　緒　　言

繊維強化プラスチックが基材として多用されるプリント基板は，ビルドアップ工法による配線回路の多層化により，高密度化に対応してきた．しかし，より一層の高密度化に伴い加工穴の高品質化の要求が厳しくなってきている．そこで，次世代の高密度化技術として，極薄銅箔（9μm 以下）表面にレーザ吸収性を高める処理を行った外層銅箔を炭酸ガスレーザで直接加工する Cu ダイレクト穴あけ法の実用化が期待されている.[1)]著者らは，従来手法であるラージウィンド穴あけ法[2), 3)]を想定して穴加工メカニズムの解明および穴品質の評価を行ってきたが，Cu ダイレクト穴あけ法に関する研究には至っていなかった.[4)～6)]そこで，本報では Cu ダイレクト穴あけ法特有の穴品質支配因子の解明を試みた．外層銅箔の存在に起因する因子として外層銅箔のレーザ吸収率に着目し，赤外線サーモグラフィを用いた吸収率測定手法を提案し，吸収率が穴品質に及ぼす影響を調べた．さらに外層銅箔とビルドアップ層の熱加工特性の差に着目し，ビルドアップ層の熱物性が異なる基板を用いて，熱物性の違いが穴品質に及ぼす影響を調べた．

2　実　験　方　法

2・1　ビルドアップ工法における穴あけ方法の比較

ビルドアップ工法とは，ベースとなる従来プリント基板上に絶縁層と電気回路配線層を積み重ね，層間の電気接続用止まり穴（Blind Via Hole，以下 BVH と称す）を加工する工程を繰り返すことによって，3 次元的な電気回路構造を実現した多層プリント基板を製造する手法である．ビルドアップ工法による多層プリント基板の製造工程（例として 4 層回路の場合）を Fig. 1 に示す．主な工程は，(a) コア基板の両面に銅箔で回路パターン（内層回路）を形成する，(b) その両面に絶縁層を積層（ビルドアップ）する，(c) レーザを用いて，内層回路銅箔上に BVH を加工する，(d) ドリルを用いて貫通穴を加工する，(e) デスミアなどの洗浄処理後，銅メッキにより内層と外層回路の電気接続を行う，(f) エッチングで外層の回路パターンを形成する，である．現在の BVH の形成手法としては，量産性の面から炭酸ガスレーザが主に使われている．しかし，炭酸ガスレーザは，回路用銅箔にほとんど吸収されないため，外層銅箔を直接加工することは難しい．そこで，現在では，Fig. 2 (a)に示す

†　原稿受理　平成 17 年 9 月 12 日　Received Sep. 12, 2005
*　正 会 員　同志社大学工学部機械系学科　〒610-0321　京田辺市多々羅都谷，Dept. of Mech. Eng., Doshisha Univ., Tatara, Kyotanabe, 610-0321
**　正 会 員　滋賀県立大学工学部機械システム工学科　〒522-8533　彦根市八坂町，Dept. of Mech. Systems Eng., The Univ. of Shiga Pref., Hassaka-cho, Hikone, 522-8533
***　参天製薬㈱　〒522-0314　滋賀県犬上郡多賀町，Santen Pharmaceutical Co., Ltd., Inukami-gun, Shiga, 522-0314
****　同志社大学大学院　〒610-0321　京田辺市多々羅都谷，Graduate Student, Doshisha Univ., Tatara, Kyotanabe, 610-0321

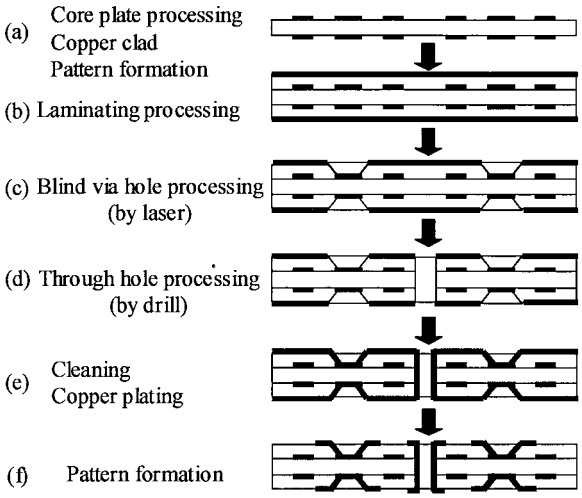


Fig. 1　Manufacturing process of multi-layer PWBs.

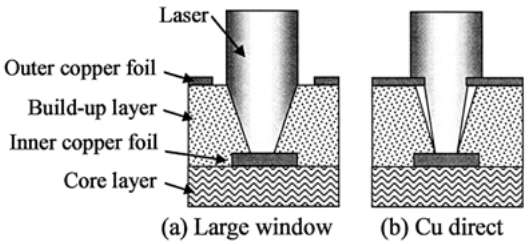


Fig. 2　Laser drilling methods for blind via hole.

ラージウィンド穴あけ法が主流となっている．すなわち，外層銅箔に目標とする穴径よりも大きいウィンドをエッチング形成後に，露出したビルドアップ層にレーザを照射して BVH を形成する手法である．しかし，エッチングによるウィンド形成の位置精度には限界があり，回路高密度化の障害となっている．一方，本報で取り上げた Fig. 2 (b)に示す Cu ダイレクト穴あけ法は，内層回路パターン基準で BVH を形成するので穴位置ズレが小さく高精度な加工が実現できる．また，ウィンド形成プロセスが不要となり，他工程は従来手法と同じプロセスを適用できるなどメリットが多い．さらに，外層銅箔に極薄銅箔を用いることから，回路配線のファインピッチ化にも有利となる．しかし，外層銅箔を確実に貫通させるために，過剰なエネルギを投入することとなり，加工閾値の大きく異なる銅と樹脂を同時に加工するため，BVH 形成後に外層銅箔の突出し（オーバハング）が生じることが，Cu ダイレクト穴あけ法特有の因子であり，穴品質確保を困難にしている．

2・2　加工装置

米国 SYNRAD 社製炭酸ガス（CO_2）レーザ 57-1-28W を穴加工装置に用いた．出力 100W，シングルモードのレーザを焦点距離 63.5mm（2.5 インチ）のレンズにてプリント基板上面が焦点（約 ϕ0.3mm）となるよう集光して加工した．なお，アシストガスとして窒素を用いた．

2・3　加工材料と表面銅箔の処理

使用したプリント基板材料は，コア層を従来のプリント基板に多用されている GFRP（ガラス布基材エポキシ樹脂積層板，厚さ 1.6mm，基材積層数 8 層，繊維含有率 60wt%）基板とし，ビルドアップ層は，炭酸ガスレーザ加工用に開発された AFRP（テクノーラ繊維不織布エポキシ樹脂板，厚さ 0.2mm，繊維含有率 50wt%）基板とした．プリント基板内部の内層銅箔厚さは 35μm 一定とし，プリント基板表面の外層銅箔厚さを 0，3，9，18μm とした．これらはすべて，新神戸電機社製である．

ここで，炭酸ガスレーザの波長 10.6μm に対して，有機系材料の AFRP は吸収性が良い反面，金属は吸収し難く銅箔表面でほとんど反射されてしまう．そこで，外層銅箔表面に黒化処理を施してレーザ加工を行った．黒化処理とは，本来，多層プリント基板の積層において，銅箔の接着性を向上するための前処理として銅箔表面を亜塩素酸ナトリウム液にて酸化処理する方法である．

2・4　BVH 形成条件

レーザの投入エネルギ量により Fig. 3 に示す 3 種類の加工穴が形成される．すなわち，Fig. 3 (a)に示す穴が内層回路銅箔まで達しない場合，Fig. 3 (b)に示すビルドアップ層は除去するが，内層回路銅箔は貫通しない場合（BVH の形成），Fig. 3 (c)に示す内層回路銅箔も貫通する場合である．レーザ照射時間と BVH が形成される割合（当該条件で 20 穴加工し，そのうち BVH が形成された割合）の関係を Fig. 4 示す．Fig. 4 より，従来手法であるラージウィンド穴あけ法（外層銅箔 0μm）では，内層銅箔に達するまでに必要な照射時間は小さく，加工能率は高いが，100%BVH 形成可能なレーザ照射時間領域（以下，BVH 形成領域と称す）は狭い．一方，Cu ダイレクト穴あけ法の場合（外層銅箔 9μm）では，外層銅箔が厚くなると内層銅箔に達するまでに必要な照射時間は長くなるが，BVH 形成領域が広くなる．

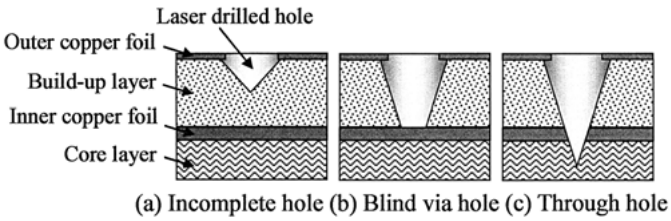


Fig. 3　Types of laser drilled hole.

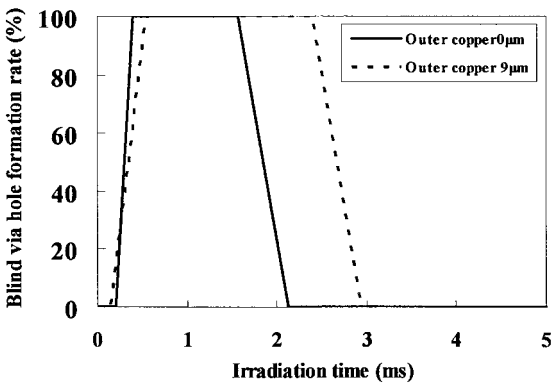


Fig. 4　Irradiation time vs. BVH formation rate.

3　Cu ダイレクト穴あけ法での BVH 品質

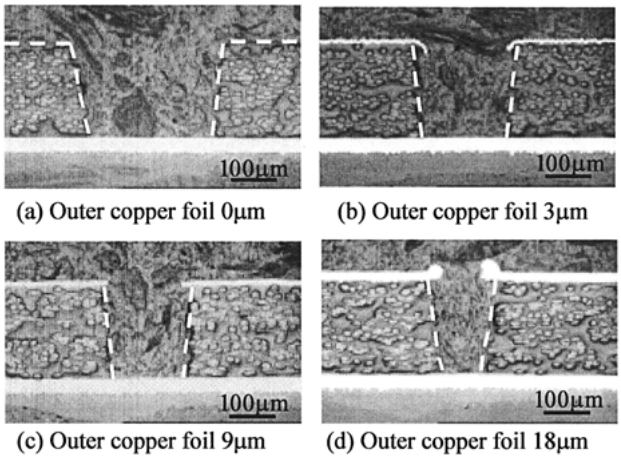
Cu ダイレクト穴あけ法での BVH 品質因子として，BVH 形成後の銅メッキ工程におけるメッキ液の付き回り性やソルダーレジスト穴埋め時のボイドの発生に影響を与える加工穴断面形状，特に，加工穴径に関して，従来手法であるラージウィンド穴あけ法との比較を行う．さらに，Cu ダイレクト穴あけ法特有の外層銅箔によるオーバハングについても評価する．

3・1　加工穴断面形状

照射時間 1ms，外層銅箔厚さ 0，3，9，18μm の場合の加工穴断面写真を Fig. 5 に示す．Fig. 5 (a)のラージウィンド穴あけ法（外層銅箔 0μm）と比較して，Fig. 5 (b)～Fig. 5 (d)の Cu ダイレクト穴あけ法では，外層銅箔が存在することで，加工穴径が小さくなり，また，穴壁面のテーパ角度が小さくなる傾向にあることがわかる．さらに，穴入口に外層銅箔によるオーバハングが発生していることが確認できる．

3・2　加工穴径

回路配線の狭ピッチ化に伴い，穴径絶対値だけでなく，穴径バラツキも重要な品質因子とされている．Fig. 6 に，照射時間 1ms 一定とした場合の外層銅箔厚さと加工穴入口径の関係を示す．照射時間一定の場合は，外層銅箔厚さの減少に伴い，加工穴入口径が増大することがわかる．



(a) Outer copper foil 0μm　(b) Outer copper foil 3μm

(c) Outer copper foil 9μm　(d) Outer copper foil 18μm

Fig. 5　Drilled hole by laser. (Irradiation time 1ms)

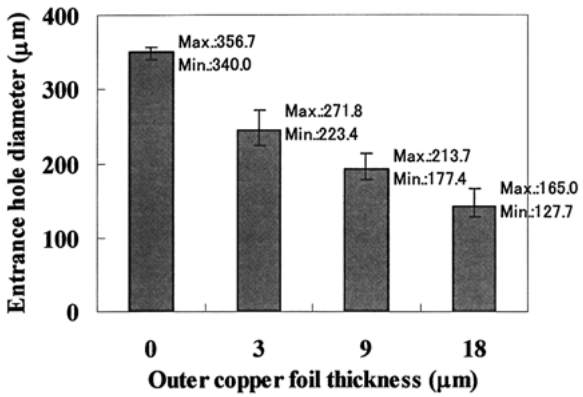


Fig. 6　Outer copper foil thickness vs. Entrance hole diameter.

ここで，2・4 節で示したように外層銅箔厚さが小さいほど，BVH 形成領域が狭くなっていた（Fig. 4 参照）のは，外層銅箔の加工穴径が大きく影響していると考えられる．加工穴径より外側では，レーザ照射に対して外層銅箔によるマスキング効果が働きエネルギがカットされることになる．そのため，外層銅箔の加工穴径が大きいほど内層銅箔に，より多くのエネルギが投入されることとになり，内層銅箔が貫通しやすくなる．一方，外層銅箔が存在することにより加工穴入口径のバラツキが大きくなっていることもわかる．すなわち，外層銅箔厚さ 0μm では約 5% のバラツキが，外層銅箔厚さ 18μm では約 26% のバラツキとなっている．これは，黒化処理の不均一性のため，外層銅箔表面のレーザ吸収率に場所によるバラツキが生じたためと考えられる．

3・3　オーバハング長さ

オーバハングの発生は Cu ダイレクト穴あけ法特有の現象である．加工穴入口径を一定 (200μm) とした場合の外層銅箔厚さとオーバハング長さの関係を Fig. 7 に示す．外層銅箔厚さが大きいほどオーバハング長さが増大し，BVH 品質が低下していることがわかる．加工穴入口径 200μm 一定とした場合，銅箔厚さの増加に伴ってレーザ照射時間が増加する．特に，外層銅箔厚さが大きい 18μm の場合は，内層銅箔が貫通してしまい，加工穴底部の品質も好ましいものではない．プリント基板製造において必要とされる穴径は，外層銅箔厚さに無関係である．従って，外層銅箔の薄化は回路のファインパターン化だけでなく，BVH 品質向上にも有効である．

4　外層銅箔性状の影響

前章より，Cu ダイレクト穴あけ法では，従来のラージウィンド穴あけ法と比較して，加工穴径のバラツキが大きいことが判明した．プリント基板製造において，加工穴径の均一化は形成回路の信頼性確保のために極めて重要な課題である．本章では，穴径バラツキ要因の解明のために，外層銅箔のレーザ吸収率を評価する．

4・1　サーモグラフィによる吸収率の測定

Cu ダイレクト穴あけ法では，外層銅箔に表面処理を施すことにより，レーザ吸収率が向上し，BVH 形成が可能となる．そこで，外層銅箔面全体におけるレーザ吸収率およびその分布を評価する．なお，吸収率の測定は，透過率が 0 の場合，ある温度における物質の吸収率の値

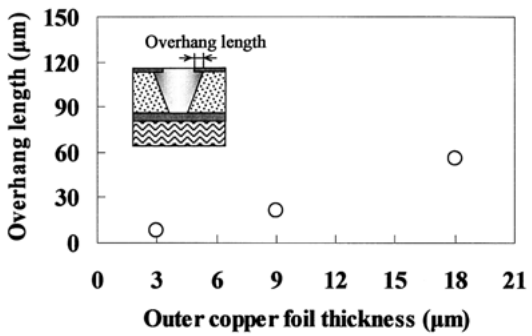


Fig. 7　Irradiation time vs. over hang length. (Entrance hole diameter 200μm)

は放射率と同じであるというキルヒホッフの法則に基づき，放射率を測定することで行う．測定には日本アビオニクス社製赤外線サーモグラフィ TVS-620 を用いた．本装置の検出波長は 8 ～ 14μm であり，CO_2 レーザ波長 10.6μm を含むため，レーザの吸収率に近い値を測定できると考えられる．S/N 比を向上させるため対象を 100℃一定に加熱し，接触式温度計で基板温度を直接測定し，赤外線サーモグラフィで，接触式温度計表示温度と同じ値を指示する放射率を調べた．測定系を Fig. 8 に示す．

4・2　測定吸収率の妥当性

赤外線サーモグラフィを用いて測定した吸収率の妥当性を検証する．まず，赤外線サーモグラフィを用いて加工穴位置での吸収率を測定する．次に，測定した基板にレーザを照射し，外層銅箔に穴加工が開始される照射時間を記録する．一方，有限要素法による非定常熱伝導解析により，外層銅箔が融点 (1356K) に達する吸収率を求める．Fig. 9 に解析モデルの一例を示す．円形（シングルモード）レーザを対象としていることから，軸対称問題として解析した．使用した計算コードは MSC/NASTRAN for Windows である．外層銅箔には純銅を，ビルドアップ層には AFRP を想定し，純銅と AFRP の比重，熱伝導率，比熱はそれぞれ，8.68 × 10^3kg/m^3 と 1.39 × 10^3kg/m^3，371W/(m・K)と 0.4W/(m・K)，447J/(kg・K)と 967J/(kg・K)を入力した.[7), 8)] また，外層銅箔の表面に，ガウス分布形の熱流束を与えた．

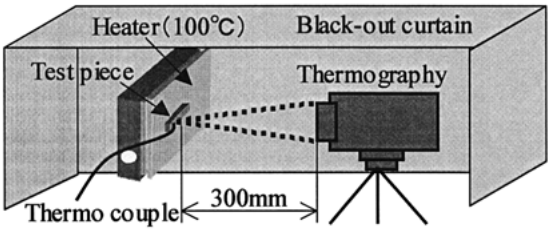


Fig. 8　Measurement system of absorptance.

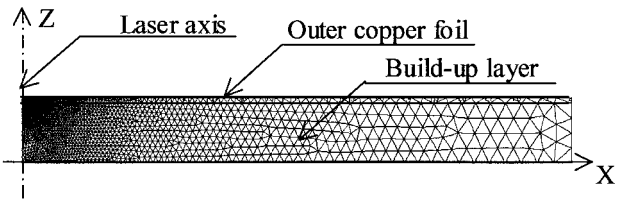


Fig. 9　Analytical model.

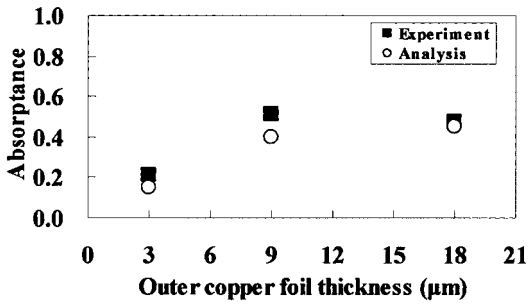


Fig. 10　Adequancy of absorptance.

両者の結果を Fig. 10 に示す．吸収率実測値の方が計算値より幾分高い値を示しているが，おおよそ同じ値を示していることがわかる．

4・3　黒化処理による吸収率の変化

外層銅箔厚さ 9μm の場合の黒化処理前後の光学写真を Fig. 11 に示す．処理前［Fig. 11 (a)］は均一な銅色，処理後［Fig. 11 (b)］は均一な黒色を示しており，可視光の波長帯による目視では両者とも均一な表面となっている．赤外線サーモグラフィを用いて Fig. 11 の基板の吸収率分布を測定した結果を Fig. 12 に示す．黒化処理前の吸収率は 0.05 (5%) 以下であるが，黒化処理後は 0.2 ～ 0.5 (20% ～ 50%) に上昇していることがわかる．また，可視光による観察 (Fig. 11(b)) ではほとんど判別できなかった，面内における吸収率のバラツキが赤外線サーモグラフィ画像では確認できている．

4・4　吸収率と穴入口径

外層銅箔表面の吸収率と加工穴入口径について評価する．Fig. 13 に照射時間 1ms 一定での吸収率と加工穴入口径の関係を示す．外層銅箔厚さごとに一つの基板を用

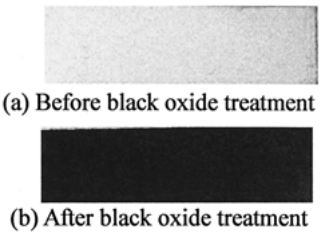


Fig. 11　Optical photo of before and after black oxide treatment. (Outer copper foil thickness 9μm)

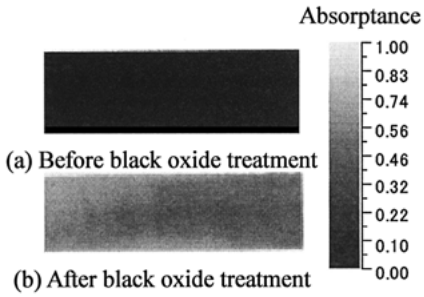


Fig. 12　Absorptance distribution by thermography. (Outer copper foil thickness 9μm)

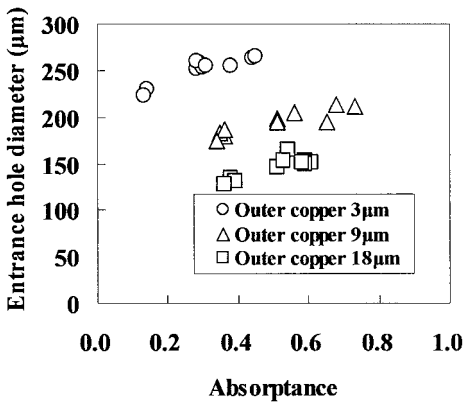


Fig. 13　Absorptance vs. entrance hole diameter.

いて同一条件にて黒化処理を行った．黒化処理後にレーザ加工し，予めサーモグラフィを用いて測定した吸収率の基板内分布から，加工点における吸収率を求めた．なお，本レーザ照射条件では，対象とした外層銅箔厚さ 3，9，18μm すべてにおいて確実に BVH が形成される．Fig. 13 から，吸収率が上昇することで加工穴入口径は大きくなる傾向にあることが確認できる．すなわち，加工穴入口径は外層銅箔の吸収率と密接な関係があり，黒化処理による穴径のバラツキは，外層銅箔の吸収率のバラツキに起因していることがわかった．従って，加工穴入口径のバラツキを低減するためには，外層銅箔吸収率のバラツキを小さくする，すわなち，より均一な表面処理を行うことが重要であることが実証された．

5　ビルドアップ層の影響

前章では，外層銅箔に着目した．次に，本章では，ビルドアップ層に着目する．**3・3** 節における外層銅箔のオーバハングの発生は，ビルドアップ層と銅の熱加工特性（熱伝導率および融点）の差に起因すると考えられる．そこで，ビルドアップ層の熱加工特性を銅の特性に近づけるために，無機フィラー（SiO_2，平均粒径 0.5μm，50wt%）を添加した基板（熱伝導率 0.8W/m・K に向上）を用いて評価する．添加した無機フィラーは，ビルドアップ層を構成するエポキシ樹脂やアラミド繊維の熱分解温度よりも高い融点を有するため，レーザ照射後に内層および外層銅箔表面に付着残存し，銅めっき性の低下など穴品質を悪化させる可能性がある．しかしながら，Cu ダイレクト穴あけ法特有の穴品質であるオーバーハング発生メカニズムの解明のために，本論文ではビルドアップ層の熱加工特性を変化させる手法として無機フィラーを添加した．

5・1　フィラー添加と BVH 形成条件の変化

Fig. 14 に照射時間と BVH 形成割合の関係を示す．フィラー添加によりビルドアップ層の熱加工性が低下し，BVH 形成に必要な照射時間が増加するのがわかる．

5・2　オーバハング長さ

Fig. 15 に照射時間 2ms にて加工したときの加工穴断面写真を示す．ビルドアップ層にフィラーを添加することで，オーバハング長さが減少していることがわかる．また，照射時間とオーバハングの関係を Fig. 16 に示す．ビルドアップ層にフィラーを添加することでオーバハング長さが約 40% 低減している．

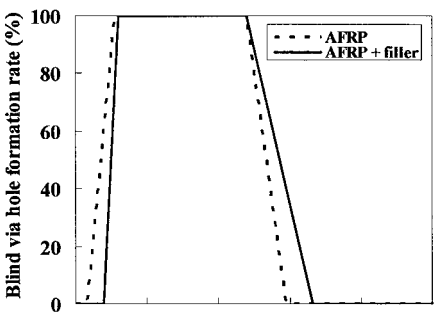


Fig. 14　Irradiation time vs. BVH formation rate.
(Outer copper foil thickness 9μm)

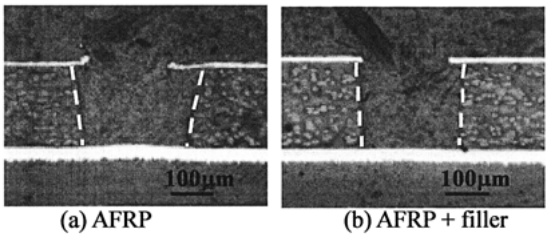


Fig. 15　Drilled hole by laser.
(Outer copper foil thickness 9μm, Irradiation time 2ms)

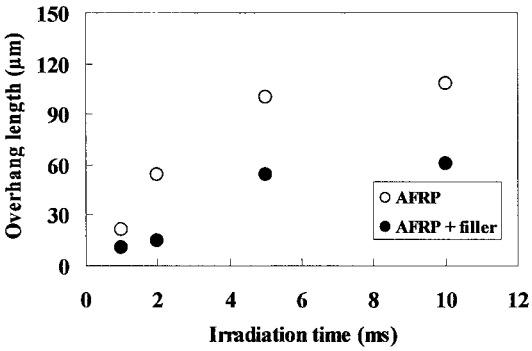


Fig. 16　Irradiation time vs. measured over hang length.
(Outer copper foil thickness 9μm)

5・3　オーバハング長さの予測

外層銅箔がない場合には，プリント基板レーザ穴あけ時の穴周辺温度は，穴壁面をテクノーラ繊維の無酸素分解温度とした非定常熱伝導解析で計算可能であることが判明している.[6] そこで本報では，Fig. 17 に示す外層銅箔を加えた軸対象モデルを考える．外層銅箔の穴壁面温度は銅の融点（1356K）とした．一方，Fig. 18 に示すようにレーザ加工時の外層銅箔周辺の温度を微小径熱電対

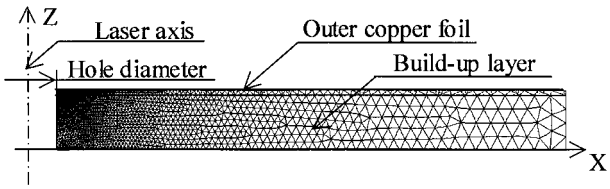


Fig. 17　Analytical model.

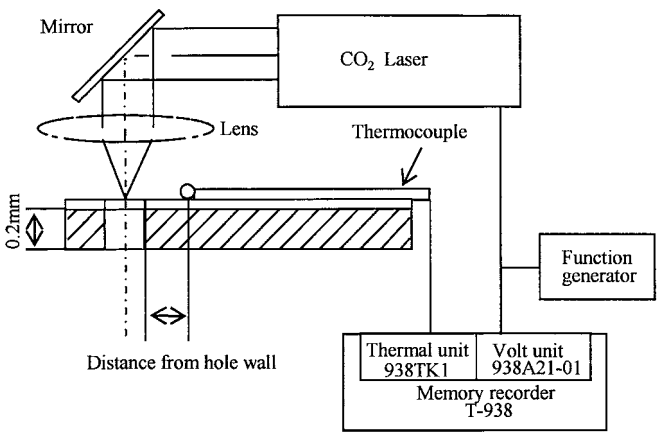


Fig. 18　Thermometry equipment.

(ϕ0.1mm) により測定した．Fig. 19 は，本モデルによる外層銅箔部の温度と，熱電対による温度実測結果である．Fig. 19 から，実測値と計算値はよく一致していることがわかる．そこで，本解析モデルを用いて，外層銅箔からの昇温によりビルドアップ層が分解すると考え，AFRP のみビルドアップではテクノーラ繊維の無酸素分解温度 (1073K) で，フィラー添加 AFRP ビルドアップでは，フィラーであるアルカリガラスの軟化点（1119K）にて加工，除去されると仮定し，オーバハング長さを算出した．解析結果を Fig. 20 に示す．Fig. 16 の実測結果と同様に，ビルドアップ層にフィラーを添加することで，オーバハング長さが約 40% 減少していることが確認できる．Fig. 16 の実測結果とは多少の差があり，定性的ではあるが，Cu ダイレクトレーザ加工時のオーバハング長さを予測することが可能であることが示された．

6　結　　論

ビルドアップ工法による多層プリント基板のさらなる高密度化を実現する次世代レーザ BVH 形成手法として，Cu ダイレクト穴あけ法に着目した．特に，品質支配要因を，外層銅箔，ビルドアップ層についてそれぞれを検討した結果，以下の結論を得た．

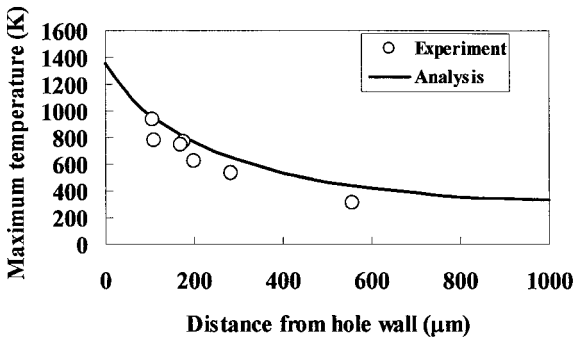


Fig. 19　Temperature of outer copper foil.
(Irradiation time 5ms)

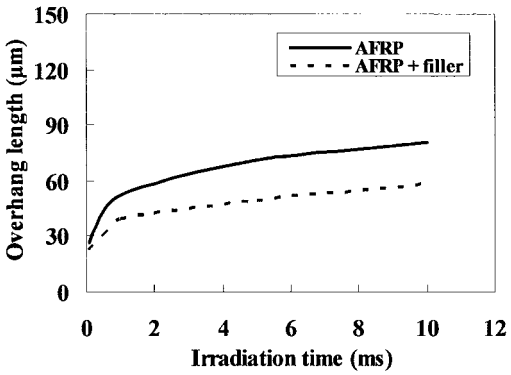


Fig. 20　Irradiation time vs. estimated over hang length.
(Outer copper foil thickness 9μm)

(1)　赤外線サーモグラフィを用いることで外層銅箔のレーザ吸収率を調べる手法を確立した．

(2)　外層銅箔のレーザ吸収率バラツキを低減することが，穴径バラツキを抑制するのに有効である．

(3)　外層銅箔とビルドアップ層の熱特性差を小さくすることがオーバハングの減少に効果的である．

(4)　有限要素法による熱伝導解析を用いて，オーバハング長さを予測する手法を示した．

本研究の一部には同志社大学学術奨励研究費を用いた．さらに本研究を遂行するにあたり，新神戸電機㈱より貴重な御助言および実験材料を提供頂いた．また，㈱ローム・アンド・ハース電子材料より黒化処理液を提供頂いた．ここに記して深甚の謝意を表します．

参　考　文　献

1）K. Arai, K. Kiyoshi, K. Muramatsu and Y. Kita, “Shin Cu dairekuto kakou-hou”, Electronic Packaging Technoloy, Vol.17, No.6, pp.38-43 (2001).

2）W. L. Burgess, “Blind microvia technology by laser”, National Electronic Packaging and Production Conference Proceedings of the Technical Program, pp.1765-1772 (1999).

3）M. Owen, E. Roelants and J. P. Van, “Laser drilling of blind holes in FR4/glass”, Circuit World, Vol.24, No.1, pp.45-49 (1997).

4）T. Hirogaki, H. Nakagawa, E. Aoyama, T. Katayama and H. Inoue, “Blind via hole in multi-layer AFRP printed wiring boards by build up process (quality of drilled hole by small power laser”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, Vol.66, No.652, pp.2268-2274 (2000).

5）E. Aoyama, R. Minagi, T. Hirogaki, H. Kondou, T. Katayama and H. Inoue, “Quality estimating model based on temperature of hole bottom in laser drilling of blind holes”, Proceedings of IPACK03, CD-ROM, Hawaii, USA (2003).

6）T. Hirogaki, E. Aoyama, T. Katayama, S. Maeda, H. Kondou and H. Inoue, “Study on surface quality in laser machining of FRP for printed wiring boards － temperature and heat affected damage in drilling of AFRP －”, Journal of the Society of Materials Science Japan, Vol.51, No.2, pp.202-206 (2002).

7）The Japan Society of Mechanical Engineers, “JSME Data Book : Heat transfer 4th edition”, pp.314-321 (1997) The Japan Society of Mechanical Engineers, Japan.

8）Shin-kobe Electric Machinery Co., Ltd., “KOBELITE Materials for printed wiring boards”, p.4 (1999) Shin-kobe Electric Machinery Co., Ltd., Japan.