熱可塑性樹脂の精密流動制御による層間・内蔵部品一括接続技術

神谷 博輝*, 竹内 聡*, 久保田 克典**, 清水 元規***, 三宅 敏広*,
青山 雅之***, 近藤 宏司***

A Control of Plastic Resin Flow for Simultaneous Press Process with Embedded Devices Technology

Hiroki KAMIYA*, Satoshi TAKEUCHI*, Katsunori KUBOTA**, Motoki SHIMIZU***, Toshihiro MIYAKE*,
Masayuki AOYAMA***, and Kouji KONDOU***

*株式会社デンソー生産技術開発部 (〒448-8661 愛知県刈谷市昭和町1-1)

**株式会社デンソー生産技術部 (〒448-8661 愛知県刈谷市昭和町1-1)

***株式会社デンソー生産技術部PALAP事業プロジェクト室 (〒470-2298 愛知県知多郡阿久比町大字草木字芳池1)

*Production Engineering R&D Department, DENSO Corporation (1-1 Showa-cho, Kariya-shi, Aichi 448-8661)

**Production Engineering Department, DENSO Corporation (1-1 Showa-cho, Kariya-shi, Aichi 448-8661)

***PALAP-Project Office, Production Engineering Department, DENSO Corporation (1 Yoshiike, Kusaki, Agui-cho, Chita-gun, Aichi 470-2298)

概要 熱可塑性樹脂を用いた一括積層基板への部品内蔵技術において、熱プレス中の加工メカニズムを明らかにし、これを、基板の設計に反映させることによって不良をつくらないプロセスを確立した。熱プレス中において、熱可塑性樹脂流体は内蔵部品周囲の空隙に向かって流動するが、周囲にある配線パターンの摩擦により抵抗を受ける。したがって、部品側面の方向に配線パターンを設ければ、横方向からの樹脂の流動が抑制され、部品電極とビアとの電氣的接合を阻害しないプロセスが達成される。

Abstract

We have been developing a technology for embedded devices in substrates made from plural patterned thermoplastic films and fabricated with a one-time hot-press process. Because an unstable substrate process may cause significant loss of devices, it is necessary for the realization of this technology to fully understand and control the behavior of the plastic resin during the pressing process.

A strong coupling analysis system was developed to understand the behavior of resin flow around via holes and embedded devices in the substrate during the press process. Our calculations show that the upper resin of the embedded devices flows faster than the side resin, which is restrained by the copper patterns. This suggests that the process design, such as the pressure as influenced by the internal structure of the substrate, is important for the control of the plastic resin flow.

Key Words: Simultaneous Press Process, Embedded Substrate, Thermoplastic Resin

1. 緒言

電子機器の高機能・小型化に対するエレクトロニクス実装の開発軸として、微細化がこれまでは大きな比重を占めていたが、近年は、部品内蔵基板やチップスタックなどの三次元実装の比重が増してきている。これは、個々の電子部品の進化だけでは限界にきており、システムとして最適な回路・実装設計をしなければ高機能・小型化を達成できなくなっていることを示しており、実際、モバイル製品が牽引役となり、三次元実装による多くのシステムインパッケージが量産されている。ただし現在のところのシステム規模は、特定の回路ブロックがモジュール化されている場合がほとんどであり^{1)~4)}、高機能・小型化をさらに追

求していくために、より大規模な回路規模をモジュール化することが求められてくるとわれわれは考えている。その場合、多種で多数の電子部品を統合集約していくこととなるため、求められる三次元実装構造としては、100個以上の部品が内蔵された部品内蔵基板が中心になると考えている。

われわれはこれまで、熱可塑性樹脂を用いた一括積層プロセスで形成されるプリント配線板を開発してきた⁵⁾。本基板は、全層に層間接続のIVH (Inner Via Hole: 以下ビアと称す) が形成される高多層基板を比較的容易に形成できることから、回路設計の自由度が極めて高く、電子機器の高機能・小型化に優位である。そして本基板に部品を内蔵する場合、内蔵される部品と基板との電氣的接続や、および

■平成22年技術賞受賞講演「受動・受動素子混載部品内蔵配線板の早期実用化」の内容についてはエレクトロニクス実装学会誌 Vol. 13 No. 5 (2010 年8月号) pp. 351~357「能動・受動素子混載内蔵配線板技術」をご覧ください。

内蔵部品の基板樹脂による封止も、すべて基板を製造する一括積層中に行われる。つまり、基板プロセスと部品実装プロセスが融合しているともいえ、本基板への部品内蔵は、構造的にもプロセス的にも大規模システムモジュールへの適用が期待できる。

しかしながら、多くの部品を基板に内蔵するための課題は多い。特に、部品内蔵としての原理的な課題、例えば「基板不良時のコストインパクトが従来の単なる基板よりも大きい」ことや、「従来と同等の電氣的検査が難しい」といったような面が、内蔵する部品が増えることにより、さらに強調されてしまうことがあげられる。部品内蔵に関する課題は、実装に携わるもの全体として乗り越えていかなければならないが、解決策の1つとしては、基板加工中のメカニズムのすべてを明らかにして、不良を作らないプロセスを確立することであろう。

われわれは今回、大規模なシステムモジュールを目指し、あわせて279個のチップコンデンサとチップ抵抗を内蔵する一括積層基板の開発を行った。一括積層基板の場合、熱プレス中にほぼすべてのことが行われるため、先の観点から見ると、特に不良をつくらないプレスプロセスの確立が量産に向けて極めて重要である。われわれは本目的に対し、熱プレス中の熱可塑性樹脂の流動挙動を、解析などを用いて明確にし、この結果を基板設計にフィードバックさせることにより達成したので、本稿にて報告したい。

2. 一括積層熱可塑性樹脂基板の概要

図1にわれわれが開発してきた一括積層基板の製造プロセスを示す。基板の材料としては、片側にのみ銅箔が張られた熱可塑性の樹脂フィルムを使用する。なお、本プロセスは樹脂を特に限定するものではないが、今回開発した部品内蔵基板には、機械・熱・電気特性に優れている観点から、液晶ポリマー（以下LCP (Liquid Crystal Polymer)と表記）を採用した。

プロセスとしては、エッチング加工により銅配線を形成することから開始する。続いて、熱可塑性樹脂面より、所定の銅ランドに対してレーザ加工が施され、ビアを形成するための有底穴の加工を行う。そしてこの有底穴には、印刷加工により、AgとSnからなるメタルペーストが充填される。ここまですべてが単一層ごとの加工であり、6層基板の場合は、これらの加工を6層分実施する。そして各層の位置あわせをした状態でフィルムを積み重ね（以下レイアップと称す）、熱プレスにより基板を成形する。熱プレス時には、メタルペースト中のAgとSnが合金化反応してビアとしての構造を形成するとともに、銅配線とメタルペースト中のSnとが拡散接合することにより層間が電氣的に接続され、オールメタルの三次元配線を形成する。また接合とともに、層間の機械的接着、および銅配線により生じる空間ギャップの封止を、熱可塑性樹脂が行う（図2参照）。

図1. 一括積層基板の製造プロセス

図2. 一括積層基板の断面写真

3. 一括積層熱可塑性樹脂基板への部品内蔵技術

3.1 部品内蔵基板プロセスの概要

図3に一括積層基板に部品内蔵する場合のプロセスを示す。さきほどの場合と比べて、主に2つのプロセスが追加される。1つめは、銅配線がエッチングにて形成された後に、熱可塑性樹脂フィルムに、パンチ加工にて貫通穴をあけるプロセスである。この貫通穴は部品が内蔵される層にのみ施され、フィルムをレイアップしたときに、部品が搭載されるための部品穴を形成する。2つめは、形成された部品穴に対して部品を搭載する工程である。この部品搭載には、通常の実装で使用する部品搭載機が用いられ、その搭載スピードも表面実装と同等であり、内蔵する部品数による工程への影響は少なくなっている。部品搭載後、残りの層をレイアップして部品に蓋をし、熱プレスにより部品内蔵基板が成形される。

図3. 部品内蔵一括積層基板の製造プロセス

図4. 部品内蔵一括積層基板の断面写真

3.2 部品内蔵基板構造の概要

図4に、今回開発した部品内蔵基板の断面写真を示す。内蔵されている部品は0603サイズのチップコンデンサとチップ抵抗である。基板層数は11層で、部品は基板中央の4～8層の位置に配置されている。部品電極と基板配線との電氣的接続はビアによりなされていて、部品の外部電極であるNiとメタルペースト中のSnとが拡散接合している（このビアを受ける銅ランド側の接続構造はその他の一般のビアと同じ）。また、部品の周囲は基板樹脂であるLCPにより密着封止されている。

構造として特徴的なものの1つとしては、部品の上下左右に必ずビアが配置されていることである。これにより部品からの電氣的信号の取り出し方としては4種類が想定され（図5参照）、一括積層基板の特徴の1つである全層IVH構造とあいまって、回路設計の自由度を高めている。また必要に応じ、部品片側の電極上下間を測定することにより、接合の品質を担保することができる。

表1に、われわれが開発した部品内蔵基板のスペックを、従来基板との比較とともに示す。著者らのナビゲーション製品で比較した場合、従来基板に比べ、高多層全層IVH構造、

図5. 内蔵部品における電氣信号の経路

部品内蔵構造、および表面実装部品間隔低減などの各実装密度向上策により、基板面積を約半減することができた。

4. 一括積層部品内蔵基板成立の課題

4.1 部品内蔵プロセスの成立

ここで本技術の成立要件と課題について述べる。1つめの成立要件としては、一括積層の熱プレス時に電氣的に必ず接合するプロセスを確立することである。なおビアの数は、各部品に4つのビアが接続するために、それだけで約1,100個（ $279 \times 4 = 1,116$ ）、11層基板製品全体としては約20,000個あり、これらを一度の熱プレスで確実に接合していかなければならない。

通常の基板を構成する部分のビアについては、ビアとこれに接合する層の銅ランドとは、プレス前からほぼ接触した状態にあるため、接合を得ることは比較的容易と思われる（図1のレイアップ時参照）。しかしながら部品内蔵部分では、部品穴と部品との寸法的なギャップにより樹脂の流

表1. 部品内蔵一括積層基板の仕様

	開発基板	従来基板
基本構造	全層IVH基板	ビルドアップ基板
配線層数	11層	6層(1-4-1)
ビアピッチ	500 μm	LVH: 450 μm IVH & 貫通 Via: 750 μm
内蔵部品	0603 チップコンデンサ } 計279個 0603 チップ抵抗 }	内蔵なし
内蔵部品間隔	0.8 mm	—
表面実装部品間隔	0.3 mm	0.5 mm
基板サイズ
実装密度	101%	46%

図6. プレス時に安定した接合をするための要件

動が複雑になることが予想され、例えば、部品電極とビアとが接触して接合する前に樹脂が流動してきてしまうと、適正な接合が得られない可能性がある(図6b)。すなわち、熱プレス中の樹脂流動挙動を正確に把握して、これを基板設計やプロセス設計に反映して制御することが1つめの課題となる。

4.2 部品内蔵構造の成立

2つめの成立要件としては、当然ながら構造としての部品内蔵基板が成立しているかである。これは構造に発生する熱応力と、構造を形成する部材強度との関係が主問題となる。熱応力については、各部材の物性から見積もることができるが、強度については単純ではない。なぜならば、ビアとしての構造は熱プレス中に形成されるが、その強度がプレス中にビアにかかる圧力に依存すると考えられるためである(図7)⁹⁾。すなわち、構造成立の観点からも、熱プレス中の樹脂流動挙動を明確にして、ビアに適正な力がかかるように基板・プロセス設計をすることが課題となる。

図7. ビア材料 (AgSn 合金) の成形時圧力と引張強度

5. 部品内蔵熱プレス加工挙動の解析手法

熱プレスは熱可塑性樹脂の融点付近の温度にて行われるが、この温度において、内蔵される部品や銅配線のような弾性体は、溶融した熱可塑性樹脂の粘性流体の中に浮いている状態といえる。そしてこの状態で、プレスの圧力が弾性体から粘性体、粘性体から弾性体へと、相互に次々と影響を及ぼしあいながら伝わっていく(図8a参照)。つまり、熱プレス中の樹脂流動挙動を明らかにする場合、弾性体と粘性体を練成させて計算する必要があるが、これらをCAE (Computer Aided Engineering)により解析した。特にわれわ

れは、本プロセスに適合した強練成解析システムをこれまで用いてきた⁷⁾。強練成システムとは、流体と弾性体とを同時に計算することであり、流体と構造体とを時系列的に交互に計算する弱練成システムに比べ、精度の高い計算結果を得ることが期待できる。図9bに強練成のアルゴリズム

a) 熱プレス中の挙動

b) 強練成システムのアルゴリズムと式の統合

図8. 強練成解析システム

図9. 熱プレス時の樹脂流動挙動解析モデル (1/4モデル)

a) 部品側面方向 銅配線なし

b) 部品側面方向 銅配線(ベタパターン)あり

図10. 熱プレス時の樹脂流動挙動解析結果 (解析モデルはFig. 9参照)

ム⁸⁾と、次元の異なる流体と弾性体を同時に計算するための、式の構造化の考え方を示す。

本解析システムを用い、熱プレス中における、内蔵部品周囲の樹脂流動の方向と速さ、および部品に接続するビア部にかかる圧力について、さまざまなモデルにおいて計算した。すべてを紹介することは難しいが、その解析結果と実機検証のいくつかを以降に示したい。なおすべての解析と検証は、プレスの圧力：4 MPa、プレス温度：320°Cにて行い、内蔵する部品は0603チップコンデンサを想定したサイズ(0.6 mm×0.3 mm×0.3 mm)で実施した。

6. 部品内蔵熱プレス加工挙動の解析結果

6.1 内蔵部品周囲の樹脂流動挙動

はじめに、基本的な樹脂の流動挙動を把握するため、図9aに示すモデルで解析を実施した。このモデルは初期状態において部品の上面と側面に空隙があるように設定されている。部品上面の空隙は部品穴の高さと部品高さとの関係で決まるため、それぞれの公差により常にあるわけではないが、接合安定性においてより不利と考えられる状態に設定した。一方、部品側面の空隙は必ず存在する。これは、内蔵部品寸法、部品穴の位置と寸法、部品搭載時の搭載位置などの公差を吸収するためである。また部品電極に接合するビアは実際には必要だが、樹脂の流動を確認する目的から、本モデルからは削除した。プレス時に樹脂は圧力の高いところから低いところへ流動していくが、部品の横にある空隙部分の圧力が最も低くなるため、樹脂はこの空隙に向かって周囲から流動してくると思われる。

図10aに樹脂流速分布の解析結果を解析ステップに沿って示す。なお図10にて、矢印の向きは樹脂の流れの方向を示し、太さは樹脂の流れの速さをそれぞれ示し、矢印のないところは樹脂がほとんど流動していない部分である。本モデル(図9a)の場合、初期的に圧力の最も高いところは、モデル中央にある部品の右側部分であり、ここにある樹脂が部品側面の空隙に向かって流動する。この空隙に向かう流動は、プレス初期段階では空隙の右斜め上方向と横方向から一斉に開始し、その後は横方向からの流れが支配的になり、最終的に空隙は、横方向からの樹脂流動により封止されている。樹脂の流速をみても最終段階まで初期の

図 11. 内蔵部品周囲の断面写真
(熱プレス中(320℃, 4 MPa)で、基板を抜き取り後断面観察を実施)

速さを保っていることから、部品側面の空隙は、部品側面方向にあった樹脂により一気に封止されと考えられる。

続いて図9bに示すモデルにての解析結果を図10bに示す。前者との違いは中央にある部品の側面方向の基板部分に銅配線(ベタパターン)があることである。先ほどと同様、モデルの右側部分が最も厚くかかる圧力も高いが、樹脂の流動挙動は異なり、プレス初期段階では空隙の右斜め上方向からの流動しかなかった。部品側面方向の樹脂は空隙方向に流れていこうとはしているが、その速度は極めて小さく、これは、銅配線による粘性の抵抗を受けて、樹脂が流動しにくくなっていると考えられる。その後も部品側面方向の樹脂の動きはほとんどなく、空隙は部品斜め上にあった樹脂により少しずつ封止される。

本解析結果の妥当性を検証するため、部品側面方向に銅パターンがあるものについて、熱プレスの途中で基板を抜き取り、その断面観察を行った(図11)。部品側面にある空隙に向かい、部品の上下にある樹脂が先に流れ込んでいることが確認された。また、部品側面の銅パターンの変形も解析結果と同様に見られることなどから、両者は矛盾しないことを確認した。

以上のことから、図6aに示したような安定した接合(まず接合し、その後封止される)を得るためには、部品側面方向に銅パターンを配置し、側面からの樹脂の流れ込みを抑えればよいことがわかった。なおこの層は、製品として電源層やグラウンド層として用いることにより、配線の制約にはならないよう設計することが可能である。

6.2 内蔵部品側面方向の設計値と接続ビア部の圧力

ここで、内蔵部品と基板ビアとの接続部分の構造設計の点から、先の結果を考察する。本基板のビア接続部では、熱プレス時にペースト中のAgとSnが焼結することによりビア構造としての強度を得るが、この反応には一定の圧力が必要である(図7参照)。接合安定性に対し、部品側面に銅配線を形成して側面からの樹脂の流動を制御したが、これは部品側面部分が基板厚み方向に変形しにくいともいえ、ビア強度確保のうえで弊害の可能性がある。端的に事例を挙げると、プレス前において、部品が入っている穴の高さが部品よりも必要以上に高い場合(フィルムの樹脂厚みが公差上限で、なおかつ部品の厚みが公差下限にあ

図 12. 樹脂流動解析モデル図

A: 内蔵部品高さ, B: 部分穴高さ, C: パターン幅(部品間隔に関連する)

解析条件: $A-B = -0.085 \sim 0.045$ mm, $C = 0.1, 0.3, 0.5$

図 13. 部品側面方向の設計値とビア部にかかる成形時圧力

るような場合)、プレス中に部品側面部が柱としてつぶることにより、接続部に適正な圧力がかからない懸念がある。

そこで、ビア強度を確保するための、内蔵部品側面の設計値について検証した。検証するにあたり考慮すべきは、①部品と部品穴との高さの差、②部品側面と部品穴との空隙、③配線パターンの密度、④隣接部品との間隔などが考えられる。このなかで、②のクリアランスについては、プロセス上のmin値にすべきことで今回は一定(0.1 mm)とした。また③については、回路設計の自由度を確保するためにすべての層に銅配線が配置された最悪状態とした(銅ベタ配置)。以上より、図12に示すような、モデルと水準においてより、流動解析を実施した。

図13に解析により求めた、熱プレス中にビアにかかる圧力をプロットした。部品穴の高さよりも部品が低いと($A-B < 0$)、結果として懸念どおり圧力が下がることが確

図14. 配線パターンとビア部にかかる成形時圧力

図15. ビア部にかかる成形時圧力とビア強度

認できた。また、部品間隔が狭くなればなるほど、同様に圧力が低下した。先に述べたように、ビアの強度確保には一定の圧力が必要である。この結果をもとに、部品間隔、部品高さ、樹脂フィルム、の設計を行い、安定したビア強度の確保に利用した。

6.3 内蔵部品上下の設計値と接続ビア部の圧力

ビアにかかる圧力としては、内蔵される部品の上下層の配線パターンやビアの有無なども同じく重要である。いくつかのパターンとその解析結果について図14に示す。さまざまなパターンが想定されるなかで、同一部品の左右で銅配線の密度が異なる場合(図14d)が、解析上最も圧力が低かった。これらの配線パターンを再現し、実際にビアの強度の測定を行った(図15)。ビアの強度は圧力が高いほど高くなる傾向が見られたが、今回の解析上の圧力範囲では、いずれの場合も強度としては十分であった。したがって、プレス圧力を4MPa以上で実施さえすれば、接続ビア強度設計の観点から部品上下層の配線パターンへの制約

はないことが明らかとなった。

7. まとめ

大規模なシステムモジュールの実現を目指し、あわせて279個のチップコンデンサとチップ抵抗を内蔵する一括積層基板の開発を行ってきた。部品内蔵の本質的な課題に対して、不良を作らないプロセスを確立するとの考えにたち、部品内蔵プレスプロセスの加工挙動を明らかにしてきた。結果、内蔵される部品周囲の樹脂の流動は、周囲の配線パターンを入れることにより制御でき、接続ビアにかかる圧力などの結果とともに基板設計にフィードバックし、安定な接合プロセスと構造を成立させることができた。

本稿にて紹介した開発基板は2008年より量産を開始しているが、今後はSiデバイスをはじめとする内蔵できる電子デバイスの種類の拡充や部品密度の向上、さらには、内蔵部品の層が基板内に2段以上ある構造などの三次元実装構造の開発を目指し、エレクトロニクス製品の高機能・小型化に貢献していきたい。

謝 辞

一括積層基板への部品内蔵技術を開発するにあたり、ジャパングアテックス、パナソニック電工、村田製作所、太陽社電気、ならびにPALAPコンソーシアムの各社(順不同)には、試作から量産にいたるまで多大なるご助言ご協力をいただき、この場を借りてあらためて感謝いたします。

(2010.7.15-受理)

文 献

- 1) 配線板製造技術委員会：“部品内蔵基板の現状と展望,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 11, No. 1, pp. 14–18, 2008
- 2) L. Boettcher: “Realization of System-in-Package Modules by Embedding of Chips,” IMAPS Device Packaging 2008, pp. 397–401
- 3) T. Gottwald: “Miniaturization by Component Embedding Made Reliable and Cost Effective,” IMAPS Device Packaging 2008, pp. 402–409
- 4) M. Okamoto: “Embedded IC Substrate,” Fujikura Giho, No. 111, pp. 54–58, 2006
- 5) K. Kondo, F. Kojima, and M. Hanai: “既成概念かえる樹脂多層基板技術が登場仕様に合わせて一括製造,” NIKKEI MICRODEVICES, 12, p. 196, 2001
- 6) Y. Yazaki: “Ag–Sn 粉末液相焼結現象を応用した多層間接続技術の開発,” Conference of Powder Metallurgy Spring 2008, p. 150
- 7) H. Kamiya: “Development of the Embedded LSI Technology in PALAP™,” 2005 International Symposium on Electronics Materials and Packaging (EMAP 2005), pp. 183–186
- 8) <http://www.cybernet.co.jp/pmd/jpn/products/sundystruct.html>