

多層基板材料の技術動向

Technological Trends of Multilayer Circuit Board Materials

中村 善彦*

Yoshihiko Nakamura

さまざまな電子機器の高機能化と多様化に伴い、多層化が進む電子回路基板の材料に求められる品質特性も多様化かつ複雑化してきている。たとえば、モバイル機器用においては軽薄短小化に対応するビルドアップ多層基板材料、車載電子制御機器用においては高温設置環境に見合う高信頼性材料、半導体パッケージ用においては微細回路形成に対応する高絶縁信頼性材料、IT通信機器用においては高速伝送に優れる低誘電・低損失材料が求められる。また環境負荷低減のため、鉛フリーはんだリフローへの対応やハロゲンフリー難燃材料も要求される。

このようなニーズの多様化に対応するためには、おのおの電子機器の要求特性を正確に捉え、これに応じた新規樹脂設計とその複合化技術、および適切な特性評価技術に基づいた基板材料の開発が重要となる。

As electronics products become more sophisticated and diversified, the requirements for the materials used for multilayer circuit boards also have become more diversified and complex. The build-up boards for mobile products are required to be light in weight, thin, and compact, while those for automotive electronic control equipment are required to be highly reliable in high-temperature operating environments. The materials for semiconductor packages are required high insulation and reliability characteristics for fine patterns. The materials for IT communications equipment are required low-dielectric, low-loss characteristics for high-speed signal transmissions. Those materials are also required to be applicable to lead-free solder reflow process, and halogen-free flame-retardancy.

To meet the needs, the required characteristics of each electronic product must be accurately identified. And it is important to design new resin materials and their compounds, and also needed to develop board material based on appropriate characteristic evaluation technology.

1. ま え が き

電子回路基板（Printed Circuit Board：以下、PCBと記す）とは、半導体、コンデンサ、抵抗部品等の多数の電子部品を表面に固定し、その部品間を配線で接続することで電子回路を構成する一般に板状の基板である。これは、ガラスクロスや紙等の基材と絶縁性のある有機樹脂とを一体化した基板の上に、銅箔などで回路（パターン）配線を構成したものである。その役割は、回路配線内の電気信号の伝達、回路間の絶縁、および搭載した電子部品の支持という三つである。なかでも多層PCBは、部品の実装密度が上がって回路配線が複雑になり、両面でも回路配線を収容しきれない場合に層を増やすことで対応するものである。現

在、さまざまな電子機器で高密度化が進んだことから4～8層の基板が一般的に使用され、高度な通信機器用のPCBでは20～40層のものも実用化されている。

多層PCBにおける層間は、図1に示すようにスルーホールやIVH（Interstitial Via Hole）で接続され、またビルドアップ型多層PCBにおいては微細なレーザビア加工で接続される。これらのさまざまな接続方法により高密度回路配線は可能であるが、接続部位の信頼性の確保が重要となる。

一方、PCBがさまざまな電子機器に使用されるのに伴い、高速化、高密度化、軽量化、高信頼性などの要求が高まっているが、その用途によりこれらの重要度も異なる。今回、電子機器を携帯電話等のモバイル機器、車載電

* 電子材料本部 電子基材事業部 Circuit Board Materials Division, Electronic Materials Business Unit

子制御機器、半導体パッケージ、大型ルータ等のIT通信機器などの用途別に、それぞれの技術動向について紹介する。また、広まる環境意識に伴いPCBについても実装時の鉛フリーはんだ対応や基板材料のハロゲンフリーによる難燃化が進んでおり、これらについても紹介する。

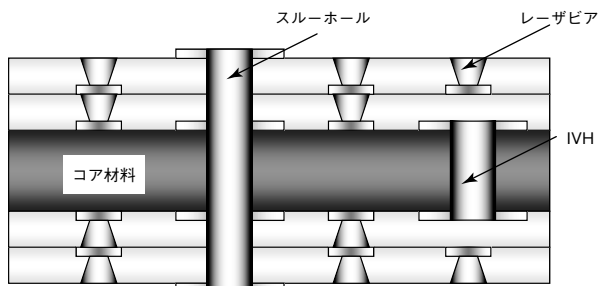
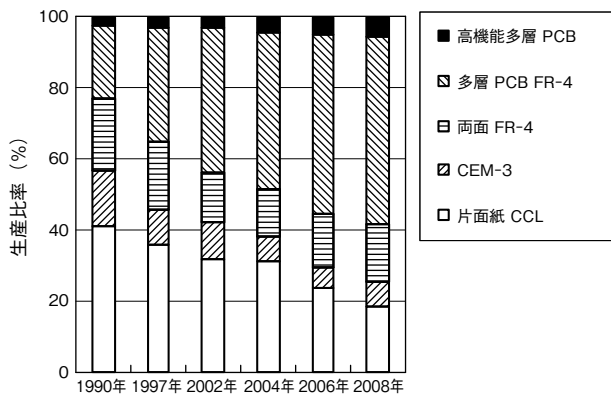


図1 多層PCBの層間接続例

2. PCB材料の動向

2.1 PCB構成の推移

全世界におけるPCB生産量に対する、片面紙CCL（銅張積層板）、CEM-3、両面FR-4、多層PCB FR-4、高性能多層PCBの生産比率の推移を図2に示す。



出典：(社)日本電子回路工業会

図2 PCBの種類別生産比率の推移

この図から、1990年には片面紙CCL、CEM-3、両面FR-4が主流であったが、1997年ごろから多層PCB FR-4が両面板の生産量に追いつき、2006年には多層PCBが主流となり、なかでも多層用FR-4の伸張が著しいことがわかる。この間、電子機器の進化から基板構成の変化も進んでおり、具体的には軽薄短小が重要視される携帯電話などのモバイル機器用基板への多段ビルドアップ構成やフレキシブル基板の活用、サーバやルータなどの高速通信機器用基板への超高層PCB化とビルドアップ構成の適用、さらには車載電子制御機器用基板への多層PCB化やビルドアップ構成の適用などが挙げられる。

2.2 PCB材料の市場規模

個々のPCBの性能を確保するためにさまざまな種類のPCB材料が開発・上市されている。そこで各種PCB材料（ハロゲンフリー材料、ビルドアップ材料、高Tg/高耐熱材料、高周波対応材料等）の市場規模推移をみるとPCBの動向がより明確になる。ジャパンマーケティングサーベイ（JMS）のデータに基づく世界のPCB材料の種類別市場規模を図3に示す。

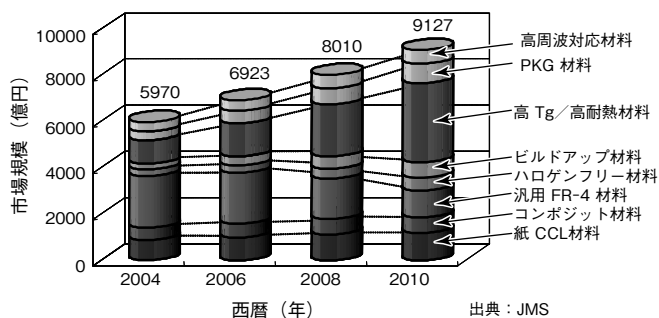


図3 PCB材料の種類別市場規模

多層PCB用の汎用FR-4が減少して、高Tg/高耐熱材料は顕著な増加傾向にある。これは、鉛フリーはんだ実装の増加に伴い、リフロー温度が高くなることへの対応が反映されているものと推測される。一方、ビルドアップ材料や高周波対応材料も伸張している。これは、携帯電話などのモバイル機器を中心にビルドアップ構成の適用が急速に拡大していることと、インターネットの普及に伴う急激な通信機器の増加と高性能化を反映しているものと推測される。また、図2の生産比率と図3の金額を対比することにより、高Tg/高耐熱材料等の販売単価が高いことが推測される^{1), 2)}。

以下に、電子機器ごとのPCB、そのPCB材料に求められる技術ニーズ、およびこれに対応する当社材料の例について述べる。

3. モバイル機器用PCB

3.1 モバイル機器用PCBの動向

モバイル機器としては、携帯電話のほかにも小型デジタルカメラやデジタルビデオカメラなどが挙げられ、もっともPCBの高密度化と軽薄短小化が進んでいる分野である。このような高密度化を実現するためにビルドアップ多層PCBの技術が進み、現在ではビルドアップ層が3段以上、あるいは全層ビルドアップ構成も実用化されている。これらのビルドアップ構成と高接続信頼性を可能にした実装技術の進化の背景には、レーザーによる微細穴あけ加工技術、高接続信頼性めっき技術、およびビルドアップ対応PCB材料技術の向上がある。

一方、回路形成は、エッチングにより銅張積層板から回路に不要な銅を除去するサブトラクティブ法が一般的であ

るが、絶縁材料の表面に微細回路を銅めっきなどで形成するセミアディティブ法も一部で実現されつつある。

以上のことから、モバイル機器用 PCB の方向性は、より高密度配線化と薄型化であると考えられる。

3.2 モバイル機器用 PCB 材料

従来のビルドアップ多層 PCB 材料は、ガラスクロスがなく絶縁層が薄い樹脂付き銅箔材料であり、炭酸ガスレーザーで絶縁層にビア加工を行っていた。しかし近年は、ガラスクロスの極薄化と、均一で開口部のないレーザー加工対応ガラスクロスの開発により、極薄かつ高剛性で絶縁信頼性の高いビルドアップ多層 PCB 材料が実用化されている。

レーザー加工対応ガラスクロスと一般ガラスクロスの表面から見た形状の違いを図 4 に示す。レーザー加工対応ガラスクロスはその表面から観察した際、ガラス糸（ヤーン）が一般ガラスクロスに比べて扁平になっており、開口部がないことがわかる。

一方、使用される PCB 材料は、ハロゲンを難燃剤として用いる汎用 FR-4 材料から、ハロゲン系難燃剤を用いないハロゲンフリー材料まで種類が広がり、現在では後者が主流になっている。これは、モバイル機器が一般の焼却ごみとして廃棄される可能性があるため、焼却時にダイオキシンの発生が少ない材料が選択されているとも考えられる。また、ハロゲンフリー基板材料に使用されている樹脂は耐熱性が向上し、さらに基板材料の熱膨張係数が低減することから、信頼性等が向上していることも一因と推定される。

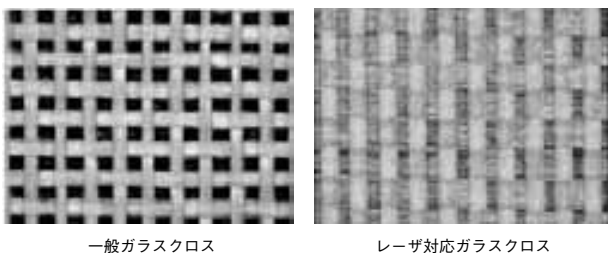


図 4 ガラスクロスの平面写真

今後のモバイル機器用 PCB 材料に対しては、ハロゲンフリーでありながら誘電率が低いこと、落下衝撃に対する部品の接続信頼性が高いこと、熱伝導率が高いこと、そして部品内蔵対応ができることなどの要求が高まるものと思われる。

4. 車載電子制御機器用 PCB

4.1 車載電子制御機器用 PCB の動向

車載用の ECU (Electronic Control Unit) には、大きく分けて動力系、ボディー系、そしてセンサ系の三つがある。これらに共通する点は、厳しい温湿度環境下での長期にわたる高い信頼性が要求されることである。一方、車両

の電子制御化が飛躍的に進み、ECU の搭載数量が加速度的に増加している。たとえば、車両 1 台当りの ECU の数は、1960 年代には実質ゼロであったのに対し、1990 年には約 10 個、2000 年代では 40 ~ 100 個となり、近年の急激な増加がみられる。これらの ECU に使用される PCB においても小型化のために高密度化が進んでおり、層数も従来の両面から 4 ~ 8 層、さらにビルドアップ構成のものも採用され始めている。

車載用 PCB の一部はその要求品質において他の分野と大きく異なり、設置環境が温度、湿度、振動ともに厳しい。したがって基板材料に対しても、接続信頼性や導通信頼性にきわめて高い品質が要求される。また車室内をより広くするため、エンジンルーム内などのさらに厳しい環境に設置できる高信頼性 ECU の数量がより増加していくものと推測される。

さらに地球環境への対応に伴い、車両が HEV 化や EV 化するにつれ、車載用 PCB にも高電圧、大電流、より厳しい高温環境への適応が求められるものと思われる。

4.2 車載電子制御機器用 PCB 材料

従来、車載用 ECU の PCB には実績の高い標準 FR-4 材料が主に使われてきたが、高温環境にさらされるエンジンルームに設置される ECU には高耐熱、高 Tg、低熱膨張タイプの材料や、一部にはハロゲンフリー材料が使用される傾向にある。なおここでのハロゲンフリー材料は、環境対応以上に、板厚方向の熱膨張特性や耐熱性が標準 FR-4 材料より良好であることから使用されている。エンジンルーム内の設置、あるいはエンジン直載設置に対する適性判断は、図 5 に示すようなスルーホール接続信頼性評価で行ってきた。この図は、当社の標準 FR-4 材料「R-1766」、ハロゲンフリー材料「R-1566」および高耐熱・高 Tg 材料である「R-1755 シリーズ」における $-40^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 125^{\circ}\text{C}$ の冷熱サイクルテストの評価結果である。なお評価基板は、厚み 1.6 mm、スルーホール径 0.3 mm、スルーホールめっき厚 20 ~ 25 μm のものを使用した。Y 軸はスルーホールで形成された回路の導通抵抗増加率が初期値の 10 % を超えた場合を故障と判定したときの累積故障率を示している。「R-1766」が 700 サイクルくらいから故障が発生し始めるのに対し、「R-1755 シリーズ」は 3000 サイクルでも故障が認められない。「R-1566」も同様に、3000 サイクルでも故障が認められない。

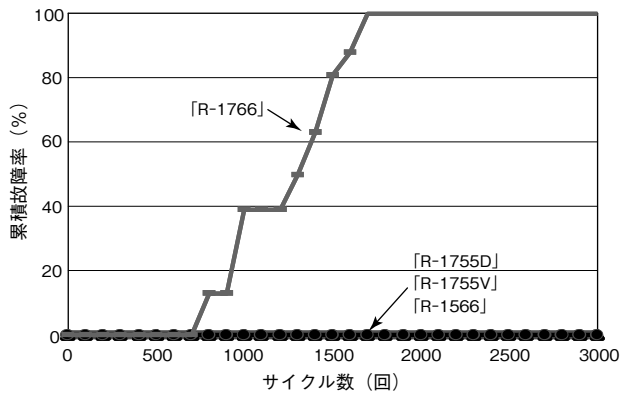


図5 スルーホール接続信頼性

一方このようなスルーホール接続信頼性に加え、設置環境の高温化に伴って表面実装部品のはんだ接続信頼性も重要視されてきた。なぜなら、部品の熱膨張係数とPCBの面方向の熱膨張係数の差異により高温環境下ではんだ接合部に熱応力が発生し、はんだクラックを引き起こして電気接続不具合が起るためである。また、環境意識が高まるなかで鉛フリーはんだに移行しつつあるが、このはんだは従来の鉛共晶はんだよりもろいため、はんだ接続信頼性で劣る傾向がある。このような問題に対応するため、当社では基板の板厚方向だけでなく、面方向の熱膨張係数も低減した部品実装高信頼性材料「R-1755D」を上市している。図6にその実装部品接続信頼性を評価した結果を示す。なお、評価条件は次に記載のとおりである。

- (1) 抵抗部品サイズ：3.2 × 1.6 mm
- (2) はんだ：鉛フリーはんだ
(組成：Sn96.5 / Ag3 / Cu0.5)
- (3) PCB構成：6層板、板厚1.2 mm 内層回路残銅率75 %
- (4) 実装方向：部品の長辺方向を基材の横方向とする
- (5) 評価環境条件：-40℃ (30分) ⇔ 125℃ (30分)
- (6) 故障判定：抵抗値が初期から10%上昇時

図のY軸は累積故障数 (n = 10) を示している。標準FR-4材料が1100サイクルから故障が発生し始めるのに対し、「R-1755D」は3000サイクルでも故障は発生しないことから、部品実装時のはんだ接続信頼性が良好であることがわかる。これは、「R-1755D」の面方向の熱膨張係数が他の材料に比べて1~2 (10⁻⁶/℃) 小さいことによるものと推測される。

なお、今回の評価でも基材の縦方向に部品を実装した場合は、すべての材料が3000サイクル処理後でも故障は発生しなかった。また、実装部品接続信頼性の結果は実装部品の形状や物性値、PCB構成(内層回路残銅率)による影響も大きいですが、各材料間での信頼性の序列は変わらず、より厳しい信頼性を要求される場合は「R-1755D」が適している。

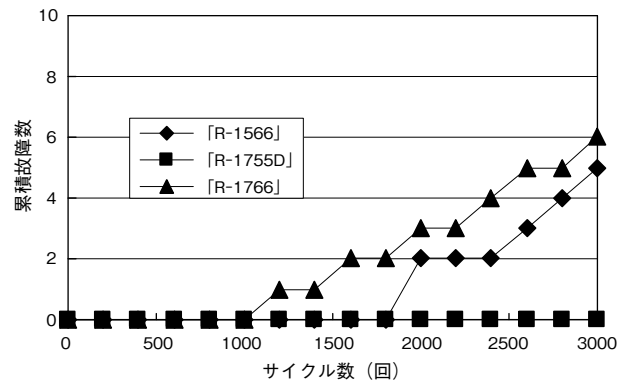


図6 実装部品接続信頼性

5. 半導体パッケージ用PCB

5.1 半導体パッケージ用PCBの動向

半導体パッケージ用PCBは大きく二つに分けられる。CPUやMPU用として使用されるものと、メモリーカードなどに使用されるCSP用である。両者とも半導体のI/O数の増加に伴って回路の超微細化と高密度化が進んでいる点は変りないが、CSP用はMPU用に比べてより薄型化が進んでいる。この理由は、これらのメモリー用半導体が多段化(POP:Package on package)が進むにつれてパッケージの厚みが増し、この厚みを抑えるためにPCBには薄さが要求されるためであり、板厚0.1 mm以下のものも実用化され始めている。

このような半導体パッケージ用PCBの薄型化のためには、接続端子の多ピン化と狭ピッチ化、スルーホールの小径化が進むと思われる。

5.2 半導体パッケージ用PCB材料

半導体パッケージ用PCBは多ピン化と狭ピッチ化が進みL/S(ライン/スペース)とスルーホール壁間距離がともに狭くなるため、PCB材料には高い絶縁信頼性が求められる。高い絶縁信頼性の確保には、材料自体の絶縁特性のみならず、小径ドリル加工性などの加工特性も関連する。また、PCBが薄くなると剛性が低下し、反りが大きくなる。なかでもリフロー工程でのPCBの反りは、半導体とPCB材料との面方向における熱膨張率の差異が主原因である。そのため、PCB材料には高剛性と面方向の低熱膨張率が要求される。さらに、今後の回路の高密度化と信号の高周波化に対して、PCB材料の高熱伝導率化や低誘電率化の要求も顕在化してきている。

またこの分野においても環境対応のため、鉛フリーはんだ実装とハロゲンフリー材料の適用が急激に進んでいる。

6. IT通信機器用PCB

6.1 IT通信機器用PCBの動向

インターネットの発展により、近年の通信機器やこれに使

用される PCB の進歩と普及には目覚ましいものがある。この分野における PCB の特徴には、① 14～40 層レベルの超高多層で総板厚が 5 mm に達するものがあること、② サイズが 400～800 mm 角と大きめで大型であること、③ 高周波信号の処理を行うため低誘電率や低誘電損失などの高周波特性が求められることなどがある。これらのうち①の超高多層は、リフロー時の耐熱性などで問題となるほか、スルーホール接続信頼性でも不具合が発生しやすい。とくに近年の鉛フリーはんだ化の推進に伴ってリフローの温度が高くなり、ますます不具合が発生する傾向にある。一方このような大型 PCB でも、半導体 BGA の I/O 数の増加に伴いビルドアップ構造が採用されつつある。このように基板構造が複雑化すると高温加熱時の歪が大きくなり、基板材料に対してますます高耐熱性、低熱膨張が要求される。

IT 通信機器用 PCB の将来の姿としては、さらに高速伝送が求められる部分を光導波路で構成して光信号で伝送するとともに、低速電気信号と電力は銅配線で伝送するという光・電気複合 PCB の登場が見込まれる。ただし、これはまだ研究開発段階のものである。

6.2 IT通信機器用PCB材料

先述のような要求から、この分野の PCB 材料には高レベルの耐熱性、高周波特性、および信頼性が必要となる。

まず超高層 PCB の耐熱性とは、PCB 材料の Tg や熱分解温度で単純に決まるものではなく、PCB 材料の熱膨張率、弾性率、接着力、PCB 加工性など複数の要因が相互に作用した結果と推測される。耐熱性不足による不具合は、PCB 材料とスルーホール部位のめっきや、内層回路との熱膨張率の差異から発生する応力によるものであり、これを抑制する要因は弾性率と接着力である。当社では Tg、熱分解温度、熱膨張率、接着力などの特性バランスを考慮した「HIPER シリーズ」を高耐熱用途として上市している。

とくに高速通信機器用の PCB 材料では、前述の耐熱性ととともに低誘電率や低誘電正接が必要とされる。高周波信号の伝送速度を向上させるためには、その速度が誘電率の平方根に反比例することから、材料の低誘電率化が必要となる。また回路配線長が長い場合は損失が問題となるが、この損失には誘電損失と導体損失が存在する。誘電損失は材料の誘電正接と誘電率の平方根に比例することから、この両者が低いことが必要である。導体損失は導体の表皮効果の影響が大きいため、使用する銅箔や内層回路の表面処理も重要となる。当社では PPE (Polyphenylene ether) 樹脂をコアとした高周波対応材料の「MEGTRON シリーズ」を開発し、要求される高周波特性のレベルに応じて多数品ぞろえしている。なかでも最上位に位置する「MEGTRON6 (R-5775)」は、非常に優れた高周波特性を有しながら多層 PCB に使用できる希少な基板材料であり、さらに加工性のバランスも良好な材料である。もちろん

この「MEGTRON シリーズ」は、超高層基板に必要とされる耐熱性も兼ね備えている。

なお、この分野でもハロゲンフリー難燃化が検討され始めているが、一般実用化までにはまだ時間が掛かるものと思われる。

7. あとがき

さまざまな電子機器の高機能化と多様化に伴い、多層化が進む電子回路基板材料に求められる品質特性も多様化かつ複雑化してきている。たとえば、モバイル機器用においては軽薄短小化に対応するビルドアップ多層基板材料、車載電子制御機器用においては高温設置環境に見合う高信頼性材料、半導体パッケージ用においては微細回路形成に対応する高絶縁信頼性材料、IT 通信機器用においては高速伝送に優れる低誘電・低損失材料が求められる。また環境負荷低減のため、鉛フリーはんだリフローへの対応やハロゲンフリー難燃材料も要求される。

このようなニーズの多様化に対応するためには、おのこの電子機器の要求特性を正確に捉え、これに応じた新規樹脂設計とその複合化技術、および適切な特性評価技術に基づいた基板材料の開発が重要となる。

今回、電子機器の機能や用途から求められる PCB の特徴、多層 PCB 用材料の技術的傾向、顧客要求内容と当社における対応について述べた。また、今回詳細は記載しなかったが、要求品質のなかで PCB 製造プロセスにおける加工性も重要な項目であり、当社は加工プロセス評価技術を高めながら材料開発へのフィードバックも重点的に進めている。

*参考文献

- 1) 吉岡 慎悟：多層プリント配線板材料の技術動向，パナソニック電工技報，Vol. 56, No. 4, P. 4 (2008)
- 2) 2009年度版日本実装技術ロードマップ (JJYR)，社団法人 電子情報技術産業協会

◆執筆者紹介



中村 善彦
電子基材事業部