

高放熱性基板材料の技術動向

Technological Trends of High Heat Dissipation Circuit Board Materials

馬場 大三* · 澤田 知昭*

Daizou Baba Tomoaki Sawada

照明用 LED 等の発熱対策では、従来の金属ベース基板は耐久信頼性、加工性、コストなどに問題があることから、高熱伝導性で低コストかつ加工性に優れたトータルバランスの良い有機基板が求められている。

有機基板における絶縁層の高熱伝導化の方法として、 ϕ m 理論の活用やフィラーの表面処理によりフィラーの高密度充填化を図る一方で、メソゲン骨格を導入した結晶性エポキシ樹脂のように樹脂材料自体の高熱伝導化の技術開発も急速に進んでいる。さらに電子機器の軽薄短小化と高放熱性を両立するため、従来からの熱伝導による放熱に加えて輻射を利用した方式が注目されている。

The conventional metal substrates that are used for dissipating heat in LED lighting devices have issues in terms of their endurance, machinability, and cost. Organic circuit board materials are required because of their well-balanced characteristics: high thermal conductivity, machinability, and low cost.

New technologies have been developed to increase the thermal conductivity of the insulation layer in organic substrates. Filler materials are being packed at higher densities by using the ϕ m theory or by processing the surface of the filler grain. The development of high thermal conductive resin materials, such as crystalline epoxy resin containing mesogenic group, is also being carried out. Further for achieving a good balance of compact-sizing of electronic equipment and high heat dissipation, heat radiation designs are attracting attention in addition to the conventional designs based on thermal conductivity.

1. ま え が き

近年、急速に普及しているデジタル家電製品のように、高速大容量の情報を取り扱う電子機器からの発熱は増大の一途をたどっている。これと歩調を合わせるかのように、小型・軽量・薄型化の進展で、部品の放熱をいかに効率良く行うかが製品のよしあしを決めることとなり、まさに熱対策の重要性が増している。

さらに最近では、照明・表示の用途で水銀レス・低消費電力・長寿命の LED の採用が急増しているが、これは点光源であるため、一般的な蛍光灯と比べて発熱密度の高い部品であり、別名光るパワーデバイスといわれる。

一般的な LED の発光効率と輝度当りの単価を年代順に示すと図 1 となる。2013 年ころには LED 照明の発光効率は、ほぼ蛍光灯に匹敵する程度にまで向上すると予想されている¹⁾。しかし、発光効率が向上したとしても、部品が小さいため蛍光灯に比べて発熱密度が高く、その対策が難

しい部品の一つであることに違いはないと推察される。

現在、実装基板の放熱構造として一般的に使用されているのが、絶縁シートを介して放熱フィンにパワートランジスタ等を貼り合わせ、放熱フィンで放熱する方法である。これは電子回路と放熱回路がある程度分離された構造となるため、熱を放散させることが可能である。しかし、放熱フィンが小型・薄型化を阻害する大きな要因にもなっている。

このような問題を解決するため、エネルギー変換効率を上げて発熱を少なくする部品の開発も進められているが、一方では基板材料や封止材のような部品周辺材料の高熱伝導化を図って熱放散性を高めたり、放熱構造の工夫によって部品の昇温を抑制する取組みも行われている。本稿では、放熱基板の利用状況について述べ、今後有望と考えられる有機基板の高放熱化に対する取組みについて概説する。

* 電子材料本部 電子材料R & Dセンター Research & Development Center, Electronic Materials Business Unit

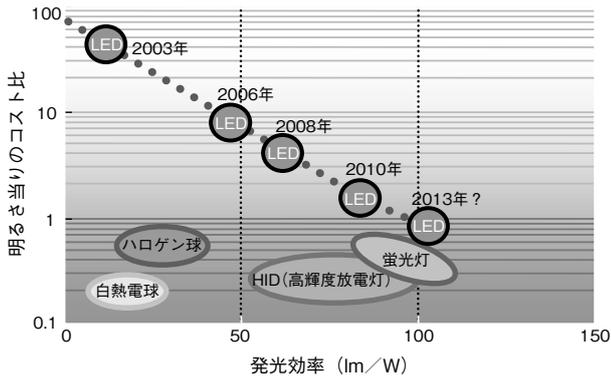


図1 LED照明の発光効率の推移

2. 放熱基板の動向

放熱基板の代表であるセラミック基板、金属ベース基板、一般有機基板（FR-4材）がどのような電子部品搭載用途に適用されているかを駆動周波数と電力量を軸にまとめたのが、図2である²⁾。また、各基板の特徴比較を表1に示す。

セラミック基板は、高電圧部品用途において、その他の基板材料に代替が難しい高い耐電圧特性と耐熱性を有している。セラミックスに厚銅回路板を接合させたDBC（ダイレクトボンデッド銅）基板^{*1)}は、特許出願後20年を経てすでに失効となっているために低価格化しているが、やはり加工メーカーが限定されることや大型基板の加工ができないために割高となる。

金属ベース基板は、金属板に薄い絶縁層を貼り付けた構造で、熱拡散効果が非常に高い。また、アルミニウム板や銅板が基板の剛直性を確保してくれるため、絶縁層厚み、フィラー充填率、弾性率やTgの設計時の自由度が高い。しかしアルミニウムベースの場合は、熱膨張係数が大きいことから冷熱サイクル試験等の信頼性試験において回路の断線が短時間で発生しやすいため、絶縁層の弾性率を低下させるなどの工夫が必要となる。また、金属ベース基板は電子回路基板の加工工数が多くなるために割高となっている。

一方、有機基板は他の基板に比べて熱伝導率と耐熱性が劣るため発熱量が比較的小さな機器での利用に限定されているが、加工性の良さや低コストの特徴を活かし、これらの製品の低コスト化に大きく寄与している。また近年のデバイス自体の高効率化により発熱量が低下する傾向にあり、有機基板も放熱性や耐熱性を改善することにより、その応用範囲はさらに拡大するものと考えられる。たとえば、直接LEDを実装した有機基板が液晶TVの直下型方式^{*2)}のバックライトユニット基板に使用されるなど、高放熱性の有機基板の需要はますます高まっている。

理想的な基板材料はすべての性能が優れるものであるが、今後は市場からの高機能化や低コスト化への要求が強まるのが予想され、これらに対応できるものとしては加工性とコストパフォーマンスに優れた有機基板がもっとも可能性があると考えられる。このため、有機基板の弱点である

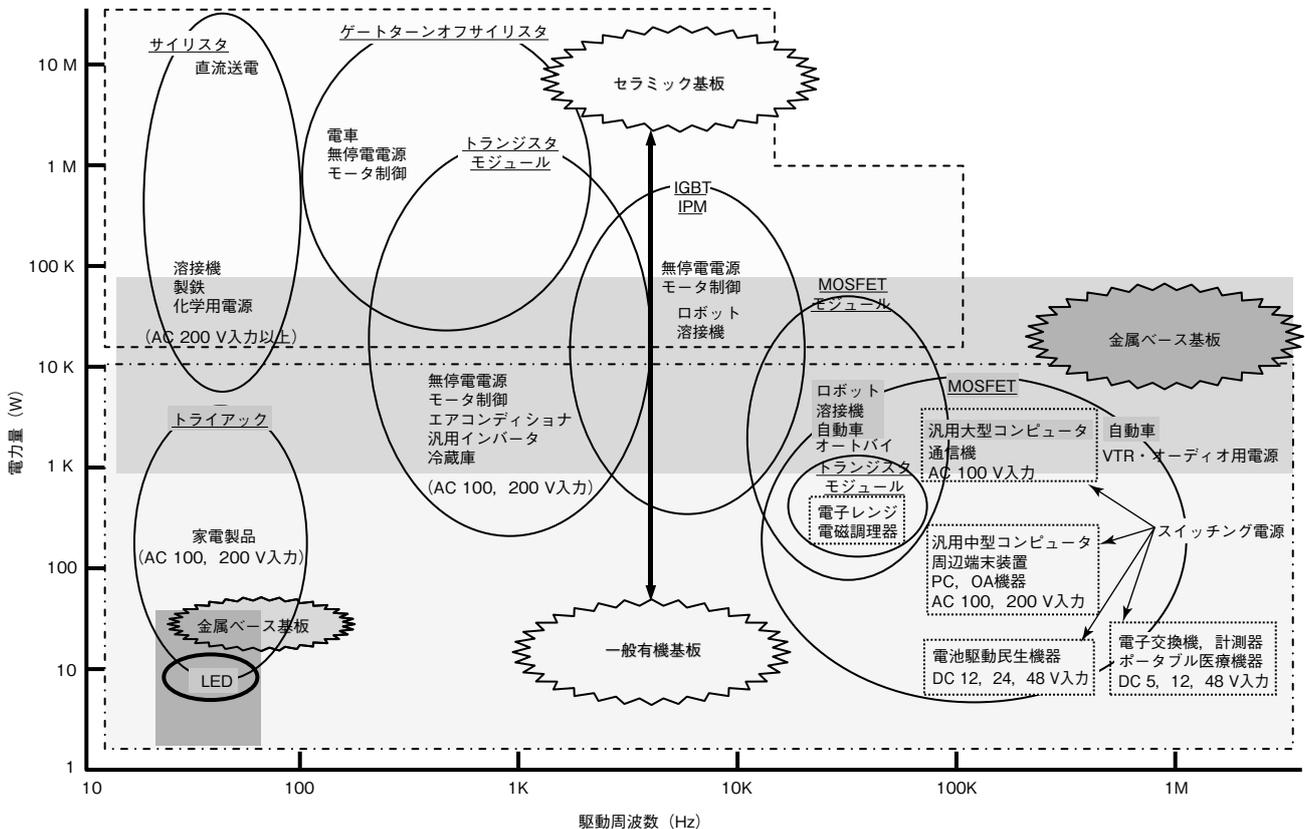


図2 各種基板の適用例

熱伝導性や耐熱性の改善が必須である。

表1 各種放熱基板の特徴

項目	セラミック基板	金属ベース基板 (アルミニウムベース)	有機基板
熱伝導性	◎	◎~○	×
耐電圧特性	◎	△	○
耐熱性	◎	○	△
加工性	×	△	◎
熱膨張率 (X-Y)	◎	×	△
コストパフォーマンス	×	△	◎

3. 高放熱化の方法

部品から発生した熱は決して消えてなくなるものではないので、基板から遠くにもっていくことで部品の温度上昇を抑制しなければならないが、その方法もいろいろと提案されている。

熱の移動方法としては、伝導、対流、輻射の三つがある。一般的に利用されているのは伝導によるものであり、熱を拡散させるにはもっとも有効な方法である。

対流を利用した例として、部品の発熱で発生する上昇気流を基板や部品表面に沿わせ、効率良く熱を機器外部に放出させる方式があるが、つねに空気を循環させるため、十分な大きさの通気口を確保する必要があり、小型で発熱量の大きい機器には不向きである。

また、輻射を利用した代表的なものは遠赤外線放射方式である。これは熱を直接電磁波(遠赤外線)に変えて発熱体から取り出す方法であるため、放熱フィンなどを用いなくても、基板そのもので放熱効果を高めることが可能になると期待されている。現在、高い放射率を有する基板材料やレジスト材料の開発が進んでいるが、実用化レベルの放熱効果までは得られておらず今後の研究成果が期待されている。

以下に、放熱効果を得るためのもっとも効果的で現在主流となっている、高熱伝導化の方法について述べる。

4. 有機基板材料の高熱伝導化の方法

有機基板材料の高熱伝導化は、使用するフィラーおよび樹脂の熱伝導率と配合比率で決まる。これらの関係は、Bruggeman の方程式である式 (1) で表される。

$$1 - \frac{\phi}{100} = \left(\frac{\lambda_c - \lambda_f}{\lambda_r - \lambda_f} \right) \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_c} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ϕ ：フィラー充填率 (vol%)、 λ_f ：フィラーの熱伝導率 ($W/m \cdot K$)、 λ_r ：樹脂の熱伝導率 ($W/m \cdot K$)、 λ_c ：複合体の熱伝導率 ($W/m \cdot K$) である。なお条件としては、フィラーが真球状で熱伝導率が等方性を有し、界面が熱的に安定な場合とされている。

図3は、式 (1) のフィラー充填率と複合体の熱伝導率

の関係を理解しやすくするため、 λ_f および λ_r をそれぞれ5倍に向上させたときの ϕ と λ_c の関係を示したものである。 λ_f を向上させると、充填率の高い領域でフィラー自体の高い熱伝導率の効果が現れて複体の熱伝導率が高くなっている。また λ_r を向上させると、基板材料自体の熱伝導率が高くなるため、比較的フィラーの充填率が低い領域においても複体の熱伝導率を改善することができる。このように、複体の高熱伝導化の方法には二つの方法があり、さらにこれらの組合せにより高い熱伝導性を確保できると考えられる³⁾。

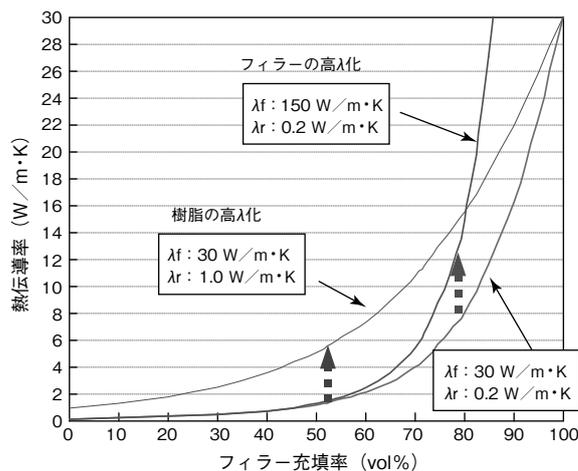


図3 フィラー充填率と複体の熱伝導率

4.1 フィラー高充填による高熱伝導化

一般的に使用されるフィラーを表2に示す。この表からわかるように、熱伝導率の高いフィラーは一般に硬度も高い傾向にあり、フィラーの充填率を高くするとドリル摩耗率が高くなり加工性も悪化する。したがってフィラーの選定においては、高充填による高熱伝導化と加工性劣化というトレードオフの関係を改善する必要性から粒径の異なるものを数種類混合して使用するため、粒度分布の選択枝が多いことや形状制御が容易なことが重要である。

次に重要なこととして低コスト、高耐水性、低イオン性不純物濃度 ($10 \times 10^{-4} \%$) が挙げられ、フィラー自体が安価でなければならない。種々のフィラーを使用して充填量を調整することにより、等方的高熱伝導率化、低線膨張率化、低吸湿化、低誘電正接化などそれぞれの用途に応じた特性の向上が図れる。

また生産性の観点では、フィラーの高充填化は成形時における材料の流動性や硬化速度にもマイナス効果を生じさせる可能性がある。これに対しては、流動性を損なわずに材料特性を向上させるフィラー設計法として、 ϕ m理論を用いた高密度充填粒度分布設計⁴⁾ および表面処理方法が各社で研究されている。

表2 フィラーの種類と特徴

項目	AlN	BN	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	Mg(OH) ₂
熱伝導率	170	60	30	40	1	8
修正モース硬度	8	2	12	6	7	3
粒度分布	△	×	◎	○	◎	×
形状制御	△	×	◎	△	◎	△
価格	×	×	△	○	◎	◎
耐薬品・耐水性	×	△	○	×	○	×

4.2 樹脂材料による高熱伝導化

前述のように、フィラーを高充填することによる高熱伝導化には、おのずと限界がある。フィラーと比較すると樹脂自身の熱伝導率は2～3桁も小さい値であるが、図3に示したように複合体の熱伝導率に与える影響は非常に大きいことから、最近では樹脂メーカーでも熱伝導率を向上させた樹脂の開発が盛んに行われている。

表3に、高熱伝導基板材料の開発状況を示す。現在検討されている高熱伝導化のアプローチとして、液晶性を発現するメソゲン骨格が導入されたエポキシ樹脂を活用する方法がある^{5)～8)}。この代表的な高熱伝導性樹脂を図4に示す。熱伝導率が5W/m・Kを超える特殊な基板材料はまだ価格が非常に高く、取扱性やフィラーとの共存においても課題があり、基板材料特性を向上させるためにはプロセス開発や設備投資が必要である。

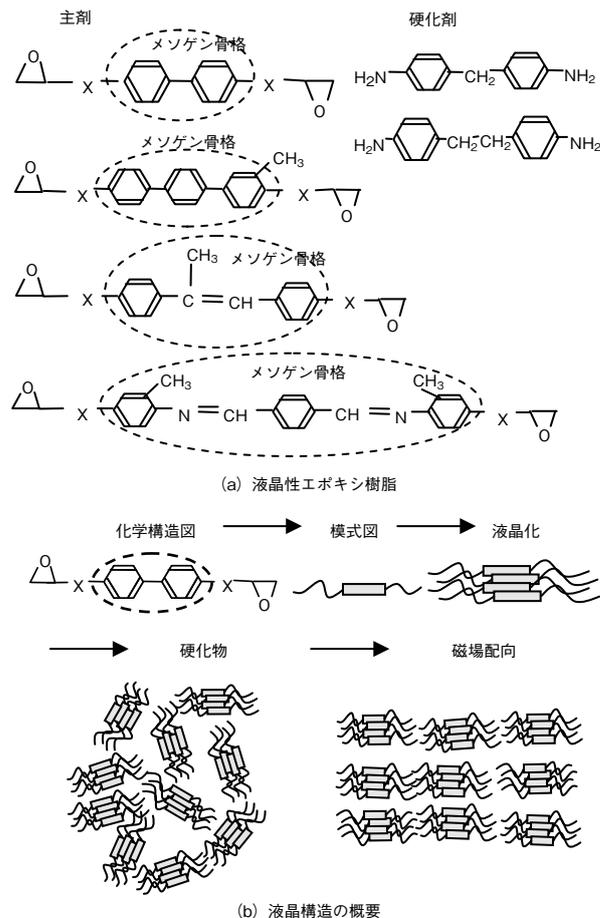


図4 液晶性樹脂の一例

表3 高熱伝導基板材料の開発状況一覧

熱伝導率	メーカー	基板構成	厚み (mm)	付与技術	マトリックス樹脂	用途
0.8	他社材	金属基板用プリプレグ	0.05	フィラー高充填, メソゲン含有エポキシ	エポキシ樹脂	LED, CPU, PE
1	他社材	CEM-3	—	—	—	LED 用基板
1	他社材	プリプレグ	0.05~0.2	フィラー高充填, メソゲン含有エポキシ	エポキシ樹脂	LED, CPU, PE
1.1	当社材	CEM-3 (ECOOL)	1~1.6	フィラー配合技術	エポキシ樹脂	LED 照明, LEDバックライト
1.5	当社材	プリプレグ	0.1~0.2	フィラー配合技術	エポキシ樹脂	LED 照明, LEDバックライト
1.5	他社材	樹脂シート	0.1~2	—	熱可塑樹脂	ヒートシンク
1.8~3.3	他社材	金属基板	—	—	—	車載, 電源, LED
3.5	他社材	プリプレグ	0.09~0.12	アルミナ高充填, メソゲン含有エポキシ	メソゲン含有エポキシ樹脂	車載, CPU, LED
3.5	他社材	プリプレグ	0.17	アルミナ高充填, メソゲン含有エポキシ	メソゲン含有エポキシ樹脂	車載, CPU, LED
2~4	他社材	アルミニウム基板	—	—	—	LED, バックライト
3.1	他社材	金属基板	0.08	—	エポキシ樹脂系	—
5	当社材	樹脂シート	0.1~0.15	アルミナ高充填	エポキシ樹脂	車載, CPU, LED
5	他社材	アルミニウム基板用樹脂シート	0.1	フィラー充填, 高熱伝導性樹脂	自己配列型メソゲン含有エポキシ	車載, 電源, LED
6~7	他社材	樹脂シート	0.3~0.5	BN フィラー垂直配向	—	LED, CPU
7.5	他社材	プリプレグ	0.13~0.2	アルミナ高充填, 高熱伝導性樹脂	メソゲン含有エポキシ樹脂	車載, CPU, LED
5~7	他社材	樹脂シート	0.2~0.4	AlN フィラー配合	熱可塑樹脂	ヒートシンク接着
10	他社材	アルミニウム基板用樹脂シート	0.1~0.15	フィラー充填, 高熱伝導性樹脂	メソゲン含有エポキシ樹脂	車載, 電源, LED
10~15	他社材	樹脂シート	0.2~0.5	BN フィラー垂直配向	—	LED, CPU
11~12	他社材	プリプレグ	0.13~0.2	アルミナ高充填, 高熱伝導性樹脂	メソゲン含有エポキシ樹脂	車載, CPU, LED
36.2	他社材	有機無機複合材	—	BN フィラー配向技術	エポキシ樹脂	パワーデバイス

*熱伝導率：レーザーフラッシュ法で測定, 単位はW/m・K

(出典：メーカーカタログ等から作成)

また、フィラーや樹脂中のメソゲン骨格を電・磁場配向によって基板厚み方向の熱伝導率のみを向上させる方法も検討されているが、硬化するまで配向状態を維持させなければならず、基板材料製造プロセスが限定されることから量産化には至っていない。

さらに、産学官連携による開発も行われている。その一つに(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業として「超ハイブリッド材料技術開発プロジェクト(2008~2011)」がある。ここでは有機・無機のハイブリッドによる基板材料の高機能化を単なる複合化ではなく、ナノレベルの無機と有機の各材料を分子レベルで表面修飾や界面活性制御などを行うことで、今まで実現できなかったトレードオフの関係を解決し、従来の複合材料を超えた機能創出をねらっている。最終目標は2011年であり、その成果が大いに期待されている。

5. 放熱性の評価

5.1 熱抵抗値

これまで述べてきたように、基板の放熱性向上には、基板材料自体の熱伝導率が高いことが重要であることがわかった。しかし、その用途や機能ごとに基板の厚みや大きさが異なる。このため同じ熱伝導率の基板材料を用いた場合でも、それぞれの基板の放熱性能は異なる。これを簡単な例を挙げて説明する。熱伝導率が同じ材料でできた厚み0.1 mmと1 mmの基板では、どちらが熱を伝えやすいだろうか。当然薄い基板のほうが裏面へ熱を速く伝える。つまり熱抵抗は薄い基板のほうが小さくなり、熱を伝えやすいということになる。これとは逆に、厚みが同じでも熱伝導率が1 W/m・Kと10 W/m・Kの基板では、どちらが熱を伝えやすいだろうか。これも当然熱伝導率が10 W/m・Kの基板のほうが裏面へ熱を速く伝える。つまり、

熱抵抗値は熱伝導率が高いほうが小さくなり熱を伝えやすいということになる。これを簡単な関係式にすると式(2)で表される。

$$\text{熱抵抗} = \text{板厚} / (\text{熱伝導率} \times \text{面積}) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、熱伝導率: W/m・K, 板厚: m, 熱抵抗: K/W, 面積: m²である。

基板設計をする場合には、基板材料の熱伝導率だけでなくこの式(2)をつねに頭に置いて設計しなければならない。また基板厚みは耐電圧の設計と関連が深いので、基板材料自体の絶縁抵抗性能も重要となる。たとえば、0.2 mm厚みで12 W/m・Kの基板と0.05 mm厚みで3 W/m・Kの基板とは実は熱抵抗的には同等特性を有する基板と考えられる。しかし、耐電圧特性は一般的には0.2 mmの基板のほうが高い値を示すと考えられるので、耐電圧信頼性の必要性に応じて絶縁層の厚みを考慮しなければならない。

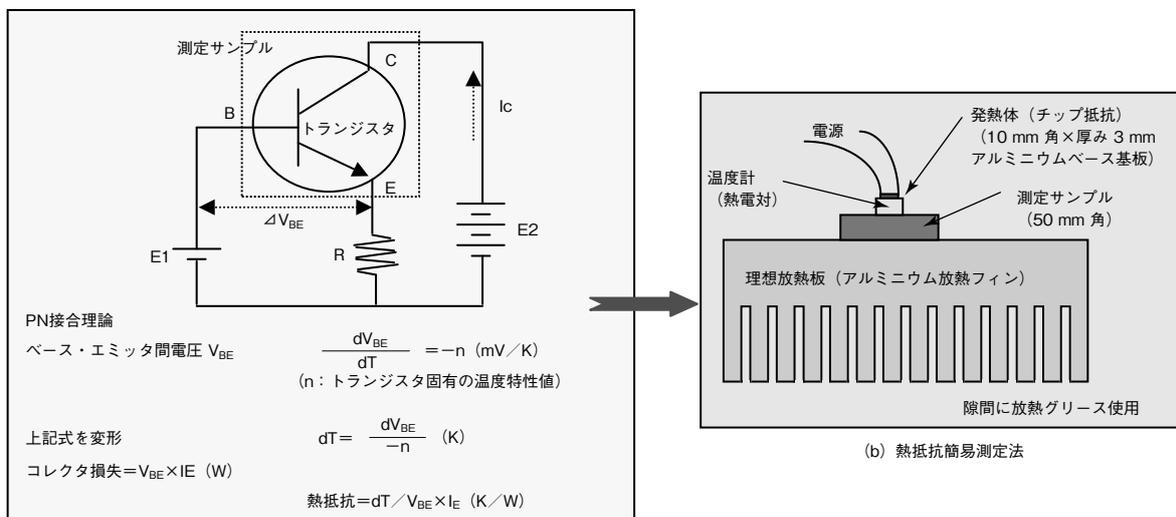
つまり耐電圧がさほど必要のない基板であれば、絶縁層を薄くするだけで熱抵抗値を飛躍的に低くすることが可能であるのに対し、耐電圧を必要とする基板は、絶縁層を厚くしなければならないために熱伝導率を向上させなければ同等の熱抵抗値を維持できないことを意味している。

式(2)から簡易的に熱抵抗値を導き出せるが、使用する熱伝導率は測定方法*³⁾によって値が大きく異なるため、計算結果が大きく違ったり、内層回路やサーマルビアが存在する場合は計算で求めることが難しい。

5.2 簡易測定法

そこで当社では簡易的に熱抵抗値を測定しているのので、その方法を紹介する。

図5(a)はトランジスタのベース・エミッタ間の微小



(a) ΔV_{BE} 法による熱抵抗測定の理論

図5 熱抵抗値の簡易測定方法

電圧の変化を読み取り、それをトランジスタの特性定数を活用した計算式から変化した温度（上昇温度）に換算して求める場合の概要図である。図5 (b) はそれとほぼ同等の結果を得られる熱抵抗測定方法で発熱体にチップ抵抗を使用し、実際に部品の内部温度を測定して熱抵抗を測定する方法である。この測定では部品やサンプル基板の貼合せは熱伝導グリースを使用し、回路基板の試作は必要としないので安価かつスピーディーに熱抵抗の測定が可能である。

この測定法を用いた測定結果を表4に示す。この表から、厚みが同じなら熱伝導率を高くすれば熱抵抗は下がり、また熱伝導率が同じであれば厚みを薄くすれば熱抵抗は下がっており、式(2)をよく表した結果となっている。

表4 熱抵抗の計測結果(代表例)

材 料	絶縁層 (mm)	熱伝導率* (W/m·K)	熱抵抗 (K/W)
FR-4 材	1.2	0.4	21
1W・CEM-3 材	1.2	1.1	8
2W・CEM-3 材	1.2	2	4
3W・有機基板	0.3	3	0.7
1.5W・プリプレグ	0.1	1.5	0.5
3W・シート材	0.05	3.2	0.1

*: 熱伝導率はレーザーフラッシュ法で測定した。

5.3 評価事例

図6に示すように、LEDを実装した基板を放熱フィン上に高熱伝導シリコンシートを介して固定する。それを30℃設定の恒温槽に投入して所定の電力を印加し、LEDを発光させたときの基板表面温度を測定した。

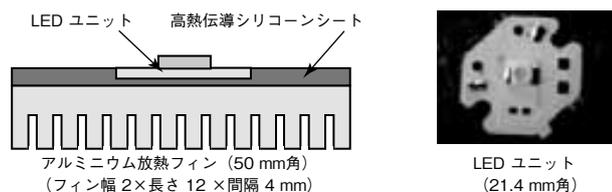


図6 放熱性測定サンプルの形状

評価した基板は表5に示すように、①は一般的なFR-4基板、②は熱伝導率が1.1 W/m·KのCEM-3基板、③は3 W/m·Kの有機基板（絶縁層1.0 mm、ベース銅箔175 μm）、④は3 W/m·Kの有機基板（絶縁層0.3 mm、ベース銅箔35 μm）、⑤は2 W/m·Kの銅ベース基板（絶縁層125 μm、銅板1 mm）である。

前述したように、一般的な有機基板である①や②は、③に比べて熱伝導率が小さいため熱抵抗が大きくなる。また④のように、③に比べて絶縁層を薄くすることにより熱抵抗は小さくなる。

これらの関係を踏まえて、図7に示す基板別のLED端子部の温度測定結果を確認すると、①や②は熱抵抗値が小

さい⑤の金属ベース基板に比べて14℃以上も温度が高くなっている。しかし、熱抵抗値が小さくなっている④では、⑤との温度差がわずか3℃程度と大幅に改善できている。

これらの結果から、LED端子部の温度は熱抵抗値の大きい順に高い値となっており、熱伝導性能を評価するパラメータとしては熱伝導率ではなく、熱抵抗値を用いるべきであることが確認できる。

また、④の有機基板は⑤の金属ベース基板に近い特性となっており、有機材料自体のより一層の熱伝導率の改善や薄膜化により金属ベース基板と同等以上の性能を実現できる可能性がある。

表5 放熱性測定サンプル一覧表

サンプル	FR-4	ECOOL	3W 有機基板		金属基板
	①	②	③	④	⑤
絶縁層厚み (mm)		1.0		0.3	0.125
熱伝導率 (W/m·K)	0.4	1.1	3.0		2.0
熱抵抗 (K/W)	17.5	6.5	2.5	0.7	0.5
回路銅箔 (μm)	35				
ベース銅材 (μm)	35	35	175	35	1000

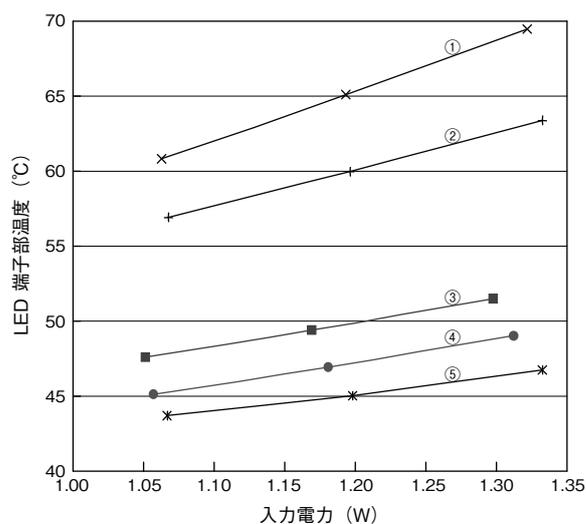


図7 各種基板のLED発光時の放熱性

6. 当社の開発状況

当社では高熱伝導性基板材料としてコア基板と接着シートを各種取りそろえているので、以下に簡単に紹介する。

「ECOOL」は熱伝導率が1.1 W/m·KのCEM-3基板で中央にガラス不織布にフィラーを充填した層を有し、表面側にガラスクロスを配した構成となっている。これは特殊なフィラー配合により放熱性と加工性とコストのバランス設計を行ったコア基板材料であり、現在はさらに高熱伝導化の開発を行っている。

シート状封止材は基材を使用せずにフィラーのみを充填させた接着シートであり、放熱絶縁用材料、厚銅回路や部品内蔵時の充填用材料等として使用されるものである。

「ECOOL-F」は、基材を使用しない厚銅フレキシブル基板であり、基板の片面を厚銅箔にして放熱特性を向上させている。この絶縁層は25 μm 程度と非常に薄いため、熱抵抗が低くなり熱放散性が良い。耐電圧がフレキシブル基板特有の高い値を示すことから信頼性も確保できるうえ、FR-4材では無理な湾曲形状の基板も可能となる。今後、加工性の良さと放熱性、耐電圧に優れた特性を活かして放熱基板用途に大きな需要があると期待している基板材料である。

さらに、フィラーを高充填した樹脂をガラスクロスに含浸させた薄膜の高熱伝導性プリプレグも開発中であり、これはビルドアップ多層化プロセスで使用される薄膜の絶縁材料となる。併せてこの高熱伝導性プリプレグを銅箔と成形した高熱伝導性のFR-4基板も開発中で、これは多層板用途のコア基板に使用され厚銅基板への展開も可能な材料である。

7. あとがき

放熱基板の開発は部品の発熱対策と並行して行われるが、くわえて耐熱性や耐電圧性も重要な特性であり、基板材料としてのトータルバランスが求められる。もちろん、市場のコスト低減の要求は厳しさを増すと考えられるので、低コストな基板設計も重要となる。

ϕm 理論の活用とフィラーの表面処理技術によりフィラーの高密度充填を可能とする一方で、樹脂材料自体の高熱伝導化技術の開発も今後急速に進み、高熱伝導性エポキシ樹脂材料が市場の要望価格になる日もそう遠くないと思われる。またニーズに合わせたフィラーレスの高熱伝導性フィルム材の開発も今後の大きな目標となろう。さらに、これらの材料技術とともに、安価な製品にするための製造プロセスの革新も必要となる。

LED照明の熱設計と照度設計では、試作品による評価に頼らざるを得ないのが現状で、製品開発スピードの律速となっているため、熱シミュレーション技術と光解析技術とを合わせてこれを解決する必要がある。

当社は「環境革新企業」の一員であり、省エネルギー技術の急務の課題として、発熱しないLEDや有機EL、電力変換効率が100%に近いインバータ電源の開発を推進している。しかしこれらが開発されるまではまだ時間が掛かるため、搭載される基板材料や封止材の放熱特性を高めて部品寿命を延ばすことで少しでも地球環境に貢献したいと考えている。

以上のように当社では放熱基板市場向けに金属ベース基板の放熱性と有機基板の加工性を両立させた高放熱性の有機基板材料の開発を中心に推進し、今後もますますユーザーの期待に応えていきたい。

●注

- * 1) DBC 基板：活性金属接合法を活用し、ろう材を介してセラミックスと銅回路板を接合してなる基板
- * 2) 直下型方式：液晶ディスプレイの光源であるバックライトの構造の一つであり、画面の背面に LED 光源を複数配置した方式
- * 3) 熱伝導率測定方法：レーザーフラッシュ法、定常比較法、プローブ法等が一般的な方法

*参考文献

- 1) 下出 澄夫, 馬場 大三: LED 照明の技術動向とソリューションについて, リードエグジビションジャパン (株), 第 11 回プリント配線板 EXPO, 専門技術セミナー予稿集, p. 1-31 (2010)
- 2) 馬場 大三: 金属ベース銅張積層板「メタボロン」の開発, 松下電工技報, No. 50, p. 31-35 (1995)
- 3) 渡利 広司: 高熱伝導性無機・有機複合材料, 産業技術総合研究所, エンジニアリングプラスチック部材の最新動向と研究開発の状況予稿集, p. 15-29 (2008)
- 4) 岸上 泰久, 橋本 眞治: 粉体工学春期研究発表会講演要旨集, p. 40-43 (1992)
- 5) 竹澤 由高: 高熱伝導性液晶性エポキシ樹脂, 未来材料, Vol. 7, No. 11, p. 28-34 (2007)
- 6) 宮崎 靖夫, 福島 敬二, 片桐 純一, 西山 智雄, 高橋 裕之, 竹澤 由高: 高次構造制御エポキシ樹脂を用いた高熱伝導コンポジット, ネットワークポリマー, Vol. 29, No. 4, p. 216 (2008)
- 7) 原田 美由紀, 濱浦 奈々, 越智 光一, 上利 泰幸: 液晶によりネットワークの配列を制御した BN フィラー充填エポキシ樹脂の高熱伝導化, 第 59 回ネットワークポリマー講演討論会要旨集, p. 69-72 (2009)
- 8) 原田 美由紀: 構造制御による高熱伝導高分子材料の開発, リードエグジビションジャパン (株), 第 11 回プリント配線板 EXPO, 専門技術セミナー予稿集, p. 32-53 (2010)

◆執筆者紹介



馬場 大三

電子材料 R & D センター



澤田 知昭

電子材料 R & D センター