

低誘電・高耐熱多層プリント配線基板材料

Low Dielectric, High Heat-Resistant Material for Multilayer Printed Wiring Board

藤原 弘明* ・ 北井 佑季* ・ 今井 雅夫** ・ 藤澤 洋之** ・ 田宮 裕記**
Hiroaki Fujiwara Yuki Kitai Masao Imai Hiroyuki Fujisawa Hiroki Tamiya

高速伝送機器に用いられる多層プリント配線基板材料において、誘電特性に優れたポリフェニレンエーテル樹脂を低分子量化し、かつこの樹脂と相溶性が良い架橋剤をブレンドすることによって、低誘電性と高耐熱性を両立させた高周波対応多層プリント配線基板材料を開発した。

この材料は誘電率 3.8, 誘電正接 0.005 (1 GHz), ガラス転移温度 210 °C の特性を有し、従来材と比較してプリント配線板の伝送損失を 5 GHz において約 15 dB/m 低減させることができるため、高速化や大容量化のニーズが高いネットワーク機器を中心としたハイエンド電子機器に幅広く使用することができる。

In the multilayer printed wiring board material used for high-speed transmission equipment, high-frequency capable material with low dielectric properties and high heat-resistance has been developed by reducing the molecular weight of polyphenylene ether resin, which has excellent dielectric properties, and blending it with a crosslinking agent having high miscibility with the resin.

This material presents the characteristics of dielectric constant 3.8, dielectric loss tangent 0.005 (1 GHz), glass transition temperature 210 °C, and capable of reducing the transmission loss of a printed wiring board by approx 15 dB/m at 5 GHz compared with the conventional material, thereby enabling wide applications in high-end electronic equipment such as network equipment requiring high-speed and large-capacity transmission.

1. ま え が き

人間の利便性や快適性の追求は情報通信分野を大きく発展させた。動画配信に代表されるように近年の情報ネットワークの進歩は目覚ましく、取り扱われる情報は大容量化している。総務省の「次世代ブロードバンド戦略 2010」によれば、日本におけるブロードバンド契約数は 2007 年 12 月末時点で 2830 万件に達しており、そのなかでも超高速ブロードバンドとされる FTTH (Fiber To The Home) の契約数は 1133 万件を超え、この 1 年間で約 40 % 増加している。

一方、エレクトロニクス機器の進歩も著しい^{1), 2)}。LSI の進歩と情報のデジタル化に伴いテレビは高精細でかつ大画面になり、臨場感のある映像が各家庭で楽しめる時代になっている。また、高速・大容量の情報が記憶できるブルーレイディスクプレーヤーや大容量メモリーカードが製品化され、リーズナブルな価格で販売されている。さらに、

携帯電話はワンセグメントの視聴やインターネット検索がいつでもどこでもできるようになってきている。

このようにエレクトロニクス機器の進歩やインフラストラクチャの整備が進むにつれて情報ネットワークを活用した新しいサービスが次々と生まれており、ネットワーク上で取り扱われる情報量はますます増大している。

さて、デジタル信号を単位時間当りに大量に伝達するには信号の波長を短くすればよく、これがいわゆる信号の高周波化である。電子機器内の電気信号は配線回路を介して部品間を移動するが、高周波域の電気信号は減衰が大きくなるために伝送特性の良いプリント配線板が望まれている。絶縁材料は誘電体であるために分子レベルで分極を有しており、交流信号を誘電体に印加すると分極が起こり、正負の電荷が誘電体内で反転運動を始めるが、信号が高周波域になると分極の反転が追従できなくなるため、電気信号が熱エネルギーとして消費されることになる。したがって、プリント配線板に用いる絶縁材料には分極率が小さい、

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

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

いわゆる低誘電率化や低誘電正接化が要求される。

またプリント配線板は、鉛フリーはんだに対応するために耐熱性をより向上させることが必要になってきている。さらに配線数増大に伴って高多層化が進んでおり、プリント配線板に用いる材料としては高ガラス転移温度（以下、 T_g と記す）化や低熱膨張化が要求されてきている^{3)~5)}。

表1に各種材料の誘電特性を示す。

従来からプリント配線板材料に多く用いられている熱硬化性樹脂のエポキシやポリイミドは、ネットワーク構造を形成するために極性基を多く含むことから、低誘電率化の達成が非常に難しい。また、フッ素の導入による低誘電率化の検討もなされているが、工業化が難しくあまり普及していないのが実情である。一方、熱可塑性樹脂であるPE（ポリエチレン）やPTFE（ポリテトラフルオロエチレン）は、誘電特性は非常に良いが多層成形性や耐熱性に大きな課題を有している。

当社では、PPE（ポリフェニレンエーテル）を架橋させることで熱硬化性樹脂に変性する技術を開発してすでに実用化しているが、多層化に関する課題は完全に解決できていなかった。

そこで筆者らは、誘電特性に優れたPPEの分子量コントロールと架橋剤のブレンド技術を駆使することにより、高多層化に対応できる低誘電・高耐熱プリント配線板材料を開発したので報告する。

表1 各種樹脂の誘電特性

樹脂	誘電率 (1 GHz)	誘電正接 (1 GHz)
エポキシ	3~5	0.01~0.03
ポリイミド	3~5	0.005~0.01
PPE	2.5	0.002
PE	2.3	0.001
PTFE	2.1	0.0005

2. 開発材の特徴

図1にPPE樹脂の分子構造を示す。

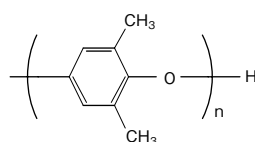


図1 PPE樹脂の分子構造

PPEは分子量が数万で誘電特性に優れたスーパーエンジニアリングプラスチックである。しかし熔融流動性が乏しいため、ハウジング材のような成形品においてはポリスチレンをブレンドすることで実用化されているが、PPE単独で実用化された例は少ない。

また、PPEはフェノール類と過酸化物を混合して加熱することで分子量を制御できることが知られている⁶⁾。フェノールにビスフェノールA、過酸化物に過酸化ベンゾイルを用いた場合のPPE分子量と T_g および極限粘度の関係を表2に示す。この表から、低分子量化することで粘度は低減できるが T_g も低下することがわかる。

そこで数平均分子量が2500のPPEを使用し、低粘度と高 T_g を両立させるために架橋剤の選定を行う。表3に示すように架橋剤は硬化物の T_g や相溶性に大きく影響する。PPEとの相溶性が良くない架橋剤Aを用いた場合、図2のようにかなり肥大化した相分離構造が観察される。この写真で黒くみえる箇所がPPE分離相である。相分離した界面の密着性が低下したことにより耐熱性が低下したと考えられ、架橋剤Aのように硬化物の相溶性が悪いと耐熱性向上の効果が小さいことがわかる。さらに、表3の結果から相溶化することで耐熱性の向上が確認できるため架橋剤の選定は非常に重要である。

表2 PPEの分子量と T_g 、極限粘度の関係

数平均分子量 (Mn)	T_g (°C)	極限粘度 η (dl/g)
2500	170	0.15
9000	190	0.25
15000	215	0.35

表3 架橋剤と T_g 、硬化物の相構造の関係

架橋剤	硬化物の T_g (°C)	硬化物の相構造	280 °C耐熱性 (0.8 mm 両面板)
A	185	相分離	×
B	185	均一相	○
C	210	均一相	○

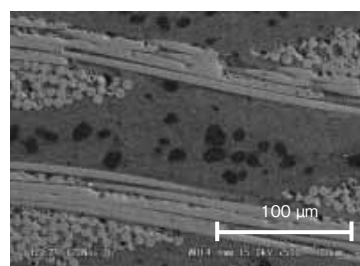


図2 架橋剤Aを配合したときの積層板の断面写真

3. 開発材の特性

開発した銅張積層板「R-5725」と当社の高 T_g タイプのFR-4材料である「R-1755S」の一般特性を表4に示す。なお、このときの評価基板の板厚は0.8 mmである。この表からわかるように開発材は誘電特性に優れ、かつ厚み方向の熱膨張係数が小さいことが大きな特徴である。

表4 開発材の一般特性

項目	測定条件	単位	開発材 [R-5725]	高 Tg FR-4 [R-1755S]
誘電率	1 GHz	—	3.8	4.4
誘電正接	1 GHz	—	0.005	0.016
Tg	DMA	℃	215	200
熱膨張係数	TMA (α_1)	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	35	50
熱分解温度	5 %質量減	℃	362	360
耐熱性	1 時間処理	℃	280	280
銅箔ピール強度	銅箔 35 μm 厚	kN/m	1.2	1.4
難燃性	UL	—	94 V-0 相当	94 V-0

次に、開発材の特徴であるギガヘルツ帯の誘電特性について、IPC 規格 TM650-2.5.5.5 に準拠して 2 ～ 10 GHz の範囲で評価し、その結果を図 3 に示す。当社高 Tg タイプの FR-4 と比較すると誘電率で約 15 %，誘電正接は約 70 % 低減できている。さらに開発材は誘電特性の周波数依存性が非常に小さいことも大きな特徴である。以上のように開発材は分子構造中の極性基が少ない PPE で材料設計をしたことで、エポキシ樹脂では達成することが難しいレベルの誘電特性を有していることがわかる。

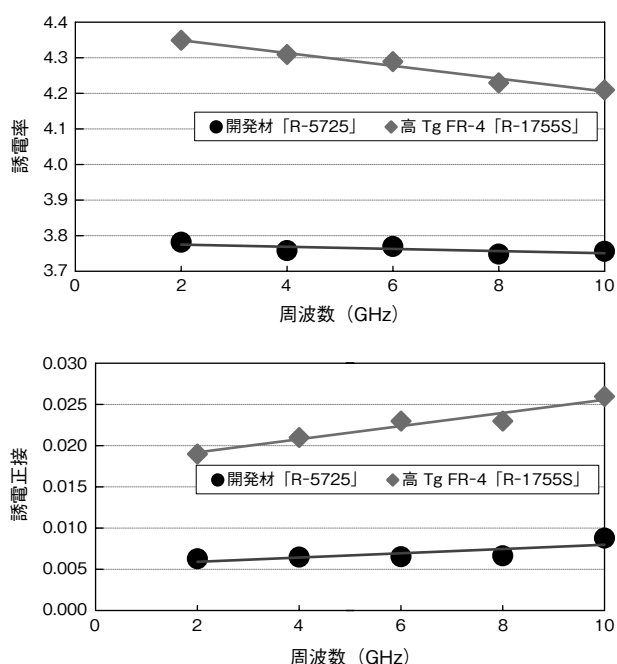


図3 ギガヘルツ帯の誘電特性 (IPC TM650-2.5.5.5)

4. 多層プリント配線板の特性

4.1 伝送特性

図 4 に示すようなストリップライン多層板を作製して伝送特性の評価を行う。

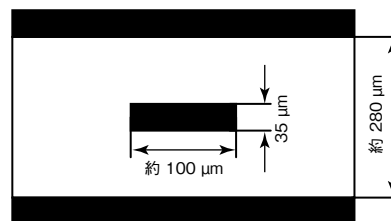


図4 ストリップライン構成 (断面図)

伝送損失 α は信号が伝達する導体で生じる導体損失 α_c と、誘電体と接することで生じる誘電体損失 α_d の和になる。

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d \quad (1)$$

Edward A. Wolff らによれば、伝送損失は以下のように表される⁷⁾。

$$\alpha_c \propto \varepsilon \times R_s(f) \quad (2)$$

$$\alpha_d \propto \sqrt{\varepsilon} \times \tan \delta \quad (3)$$

ε は誘電率， $\tan \delta$ は誘電正接， R_s は導体表皮抵抗， f は周波数を表す。

式からもわかるように誘電率や誘電正接，導体表皮抵抗を小さくすると伝送損失が小さくなり，伝送特性が良好になることがわかる。実験結果を図 5 に示す。開発材の伝送損失は当社高 Tg タイプの FR-4 と比較し，各周波数で大幅に向上しており，5 GHz では約 15 dB/m 向上している。また導体表皮抵抗が小さいと考えられる VLP (Very Low Profile) 箔は一般箔よりも伝送損失を小さくすることが可能であり，5 GHz では約 4 dB/m 向上していることがわかる。なお，表面凹凸の小さい VLP 箔を用いた場合でも開発材のピール強度は 0.8 kN/m で，耐熱性もほぼ同レベルであることを確認していることから実用上問題がないといえる。

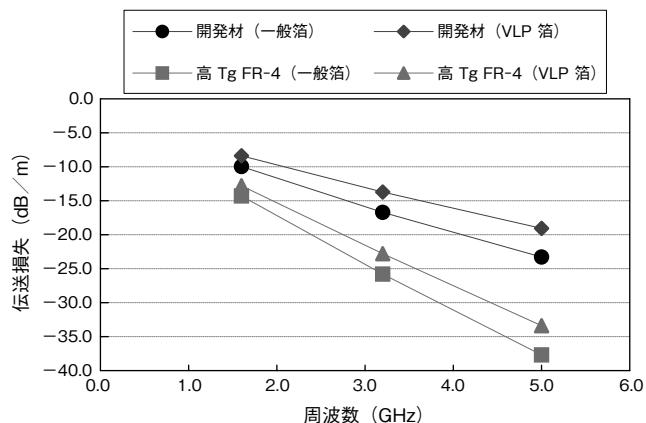
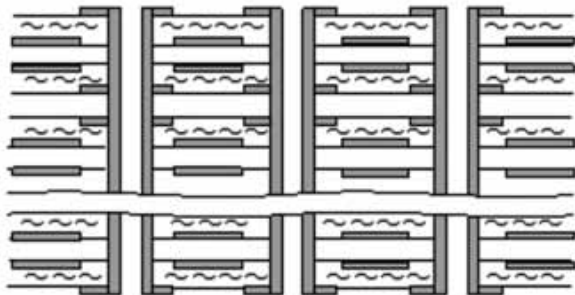


図5 伝送特性

4.2 高多層板特性

図6に示すような40層基板を作製し、はんだ耐熱試験を実施し、その評価結果を表5に示す。評価基板は総厚みが5 mm、スルーホール径が0.25 ~ 0.80 mm、壁間は0.5 mmである。288℃、10秒間のはんだフロート試験を6回繰り返してもデラミネーションやクラックの異常は発生していない。



- ・材料構成 : コア材 0.1 mm, プリブレグ 0.1 mm, 銅箔 18 μ m
- ・総厚み : 5 mm
- ・スルーホール径 : 0.25 mm ϕ , 0.45 mm ϕ , 0.65 mm ϕ , 0.80 mm ϕ
- ・スルーホール壁間 : 0.5 mm

図6 高多層性評価基板の構成 (断面)

表5 40層板の耐熱性評価結果

はんだフロート	デラミネーション	クラック
288℃×3回	異常なし	異常なし
288℃×6回	異常なし	異常なし

一般的に高多層化すると、基板の膨張や密着不良が原因となり界面剥離や回路断線が発生することがある。開発材は高Tg化や低熱膨張化、高熱分解耐性化が実現できたことで、高多層板であっても十分な耐熱性を確保することが可能であり、高温リフローが要求される鉛フリーはんだにも対応できる。

4.3 長期信頼性

4.3.1 接続信頼性

冷熱サイクルに対するスルーホールの接続信頼性評価をIPC規格のTM650-2.6.26に準拠して実施する。図7に示すようなスルーホールが1200穴ある18層評価ピースを用いる。これは別名IST (Interconnect Stress Test) と呼ばれ、基板回路に電流を流し内部から発熱させるとともに、スルーホールの接続導通抵抗値の変化をモニタする評価方法である。

開発材と高TgタイプFR-4の評価結果を表6に示す。230℃×6回、245℃×6回、260℃×6回の前処理後、冷熱サイクル試験(室温 $\leftrightarrow$ 150℃、ヒーティング3分、クーリング2分、1000サイクル)を行った結果、導通抵抗値の上昇率は10%以内となっている。このように、樹脂の高Tg化と低熱膨張化を実現したことで高いスルーホール接続信頼性を有することがわかる。

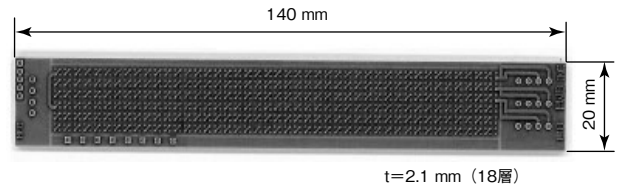


図7 IST評価基板

表6 IST評価結果

前処理	IST 1000 サイクル	
	開発材 [R-5725]	高 Tg FR-4 [R-1755S]
230℃×6回	異常なし	異常なし
245℃×6回	異常なし	異常なし
260℃×6回	異常なし	異常なし

4.3.2 絶縁信頼性

最後に絶縁材料として重要な絶縁信頼性評価結果について述べる。ガラス基材にIPC規格の#2116と#1080のガラスクロスを使用して図8に示すようなスルーホール径が0.3 mm、壁間が0.3 mmの基板を用い、85℃、85%RHの条件下で50 Vを印加してCAF (Conductive Anodic Filaments) 信頼性の評価を行い、図9にその結果を示す。

この図から、2000時間後もマイグレーションが発生せず非常に高い絶縁信頼性を有していることがわかる。この高い絶縁信頼性は、相分離を抑制したことで樹脂の相分離界面が減少し、ガラスクロスと樹脂の均質的な密着性が得られたことに起因していると考えられる。

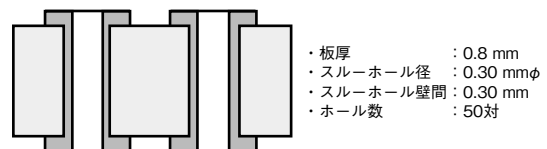


図8 CAF評価基板 (断面)

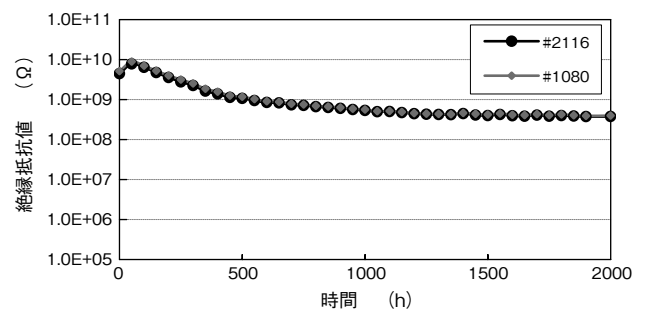


図9 CAF評価結果

5. あとがき

高速伝送機器に用いられる多層プリント配線基板材料において、誘電特性に優れたPPEを低分子量化し、かつこの樹脂と相溶性が良い架橋剤をブレンドすることによって、低誘電性と高耐熱性を両立させた高周波対応多層プリント

配線基板材料を開発した。

この材料は誘電率 3.8, 誘電正接 0.005 (1 GHz), T_g 210 °C の特性を有し, 従来材と比較してプリント配線板の伝送損失を 5 GHz において約 15 dB/m 低減させることができるため, 高速化や大容量化のニーズが高いネットワーク機器を中心としたハイエンド電子機器に幅広く使用することができる。

今後ますます進展することが予想される情報化社会に本開発材料が少しでも役に立つことを期待している。

*参考文献

- 1) 坂本 俊弘:「Digital Hearth (デジタル囲炉裏)」の提案, JEITA Review, Vol. 9, No. 3, p. 2-10 (2008)
- 2) 町田 勝彦: デジタルコンバージェンスが切り開く新しい生活, JEITA Review, Vol. 8, No. 11, p. 2-7 (2007)
- 3) 古森 清孝, 橋本 昌二, 西野 充修, 藤原 弘明, 井上 博晴: 高速・大容量伝送用多層プリント配線板材料, 松下電工技報, Vol. 54, No. 3, p. 17-21 (2006)
- 4) 藤原 弘明: 高周波用の材料, エレクトロニクス実装用高機能性基板材料, p. 141-153 (2005)
- 5) H. Fujiwara, H. Inoue, S. Hashimoto, M. Nishino, K. Komori: Novel Material having Low Transmission Loss and Low Thermal Expansion designed for High Frequency Multi-layer Printed Circuit Board Applications, ECWC10 Proceeding (2005)
- 6) D. M. White: The Synthesis of 4-Hydroxyarylene Ethers by the Equilibration of Phenols with Poly (2,6-dimethyl-1,4-phenylene ether), The Journal of Organic Chemistry, Vol. 34, No. 2, p. 297-303 (1969)
- 7) Edward A. Wolff, Roger Kaul: Microwave Engineering and System Application, p. 209-210 (1988)

◆執筆者紹介



藤原 弘明

電子材料 R & D センター



北井 佑季

電子材料 R & D センター



今井 雅夫

電子基材事業部



藤澤 洋之

電子基材事業部



田宮 裕記

電子基材事業部