

高周波回路用プリント配線板材料

平川 勝利*

Printed Wiring Board Material for High Frequency Circuit

Katsutoshi HIRAKAWA *

*松下電工株式会社電子材料・デバイスエンジニアリング総合部 (〒108 東京都港区三田5-13-2)

* Electronic Materials & Devices Engineering Department, Matsushita Electric Works Ltd. (5-13-2 Mita, Minato-ku, Tokyo 108)

1. はじめに

「高度情報化社会の到来」と叫ばれて久しい今日、私たちの日常生活においても、さまざまな製品機器が高度情報化社会を支えている。

また、21世紀を迎えることによって、ますます活発な技術開発、商品開発が実現されるであろう。高度情報化社会を支える製品機器への技術は、「情報処理技術」と「情報通信技術」の2つに大別することができる¹⁾(図1)。

今回は、特に「情報通信技術」に関わるプリント配線板の視点から、高周波回路用プリント配線板材料の現状について述べることにする。

2. 情報処理技術の動向

ここで、「情報処理技術」の動向について簡単に触れておく。情報処理技術は、主にコンピュータの分野に相当し、求められる姿としては①情報処理の高速化、②記憶容量の増大化、③装置の小型化である。このなかで情報処理の高速化(高速演算化)については、使用される多層プリント配線板の材質を低誘電率化することによって、信号伝播速度を高速化す

るというアプローチがある。一般にプリント配線板を含めた導体内の電気信号伝播速度 V (m/s) は次式で与えられる。

$$V = K \cdot \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

C = 光速

ϵ_r = プリント配線板材料の比誘電率

K = 定数

したがって、比誘電率が小さいほど信号伝播速度が速くなり高速演算が実現できる。すなわち比誘電率が小さい(低い)プリント配線板材料が求められる。一般的に、有機樹脂系のプリント配線板材料の中で比誘電率が小さいものといえば、フッ素樹脂基板がその代表であるが、従来の多層プリント配線板と比較してコストが高く、厚さ方向の熱膨張率が大きいことに起因するスルーホール信頼性への不安等から、一般的には一部の例外を除いて多層プリント配線板としては、あまり使用されていない。

したがって現状は、ポリイミド樹脂基板をベースにした低誘電率ポリイミド樹脂基板やBTレジン基板(三菱ガス化学)の採用が比較的多い。

さらに、コストパフォーマンスに優れた低誘電率エポキシ樹脂基板の開発にも期待がもたれる。

上記樹脂の代表的なものの構造を図2に示す。

3. 情報通信技術の動向

情報通信の手段として、私たちの日常生活に最も密接なものは電話であろう。従来まで電話といえ

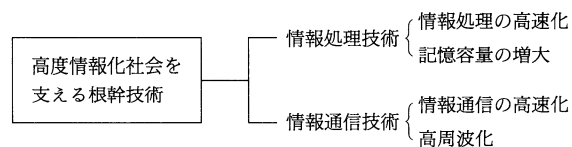
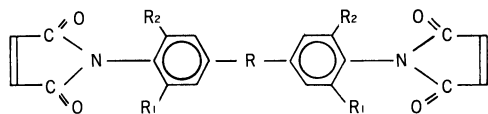


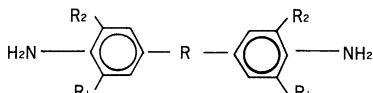
図1. 高度情報化社会を支える根幹技術

① ポリイミド樹脂の構造式

(ビスマレイミド)

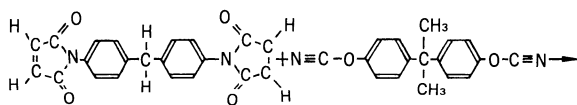


(ジアミン)



アルキル基：R₁, R₂=メチル, エチル, イソプロピル

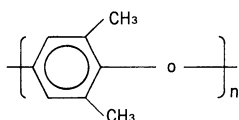
② BT樹脂



ビスマレイミド

トリアジンモノマー

③ PPO樹脂



④ フッ素樹脂



図 2 . 樹脂の構造

有線で結ばれた宅内電話のイメージしかなかったが、ここ数年のめざましい無線技術の進歩により、今日では自動車電話・携帯電話に代表される無線を使用した電話が急激に普及してきた。

また、音声だけでなく映像と音声を同時に伝える手段としては、テレビ放送〔VHF,UHF 帯域放送〕があるが、さらに高画質、高品質の要求により登場した放送衛星放送(BS)、通信衛星通信(CS)〔SHF 帯域放送〕機器も順調に普及しており、現在ではTV・VTRの国内出荷に占めるBSチューナー内蔵タイプの割合は、約30%にまで達している²⁾(図3)。

これらの無線機器に共通することは、音声信号や映像信号の伝達に電波(電磁波)を使用することであり、先に述べた普及が著しい無線機器については

(千台)

出所：通信機械工業会

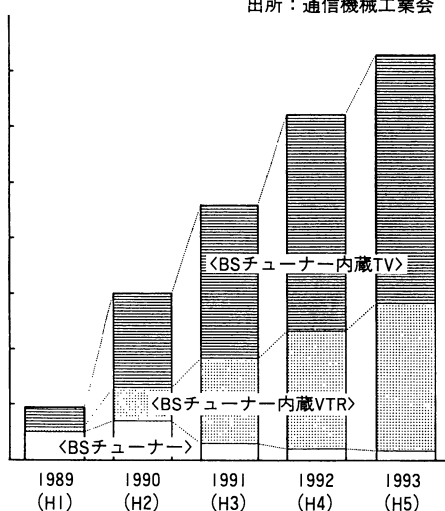


図 3 . 衛星放送関連機器出荷台数 (千台)

《電磁波の波長》《周波数》

《用 途》

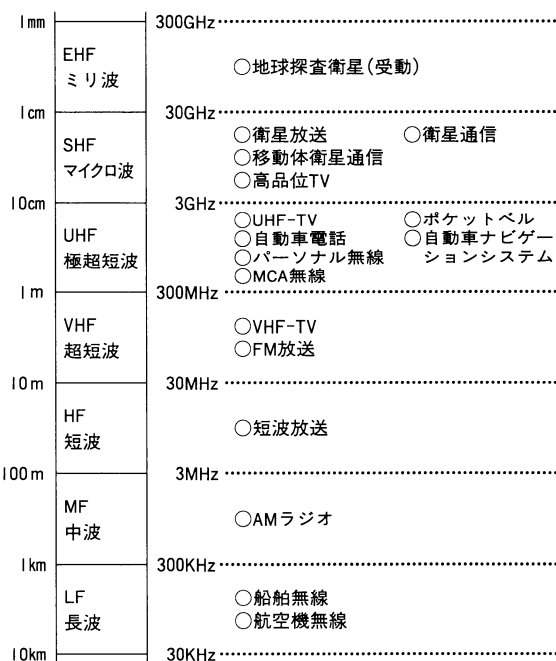


図 4 . 周波数帯域と主な用途

従来のテレビ放送等と比較して、使用される電波の周波数帯域が高いことが特徴的である。この原因は周波数帯域の有限性にある。現在使用されている無線機器は、各周波数帯域ごとに細分化されて割り当てられた電波によって運用されている(図4)。

しかし、昨今の無線通信機器の急増とチャンネル

数の増加により、割り当てべき電波の周波数帯域が不足している。また、通信の秘話性確保や品質の向上も必要になってきている。そこで、これらの諸問題を解決し、限りある電波資源を有効活用するために、現在の SHF 帯域の活用に加え、さらに高い周波数帯域である EHF 帯域の開発、通信方式のデジタル化が進められている。

この使用周波数帯域の増加、および通信方式のデジタル化が採用されている最も具体的な例は、図 5 に示す自動車電話・携帯電話への周波数割り当てである。

4. 高周波特性に優れたプリント配線板材料とは？

4.1 高周波とは？

高周波の明確な定義はないが、周波数300MHz 以上、つまり波長が1 mよりも短い電波を、一般的に高周波と呼ぶ場合が多い。

この高周波帯域の電波は、周波数によってさまざまな性質を持っている。例えば、GHz 帯域の電波（マイクロ波）は、電離層によるはね返りが少なく、特に10～20GHz 帯域の電波は、空気中の水分、塵、埃に影響されにくいことが知られている。この性質は、大量・正確な情報伝達を必要とする放送衛星放送（BS）・通信衛星通信（CS）等に最適である。

この高周波の性質を有効に活用するためには、機器の心臓部ともいえるプリント配線板とその材料にも、従来品よりも優れた特性が要求されることになる。

4.2 高周波回路用プリント配線板材料

GHz 帯域を利用する送受信機器に組み込まれるプリント配線板には、優れた高周波伝送特性が必要とされる。一般に高周波回路は分布定数回路により

設計されるが、この回路設計は回路を流れる信号の波長が基本となる。

波長は、次の式で算出できる。

波長 = $\frac{\text{回路中の信号速度}}{\text{周波数}}$

また、信号速度は次の式で算出できる。

信号速度 = $\frac{\text{光速}}{\sqrt{\text{基板材料の比誘電率}}}$

高周波回路では、波長を回路設計の基本とするために、常に波長が一定であることが必要である。したがって、前記式より導き出されるプリント配線板材料の比誘電率が、広い帯域にわたって安定（一定）であることが不可欠である。

一方、高周波（マイクロ波）は、熱損失・放射損失等によって減衰しやすい性質を持っている。電子レンジのように、熱に変換して損失する性質を逆利用した機器も存在する。

しかし、本稿で述べている高周波機器のように、高周波に乗せた音声信号・映像信号をプリント配線板上で一般的な電気信号に効率良く変換させるためには、変換時の損失をできるだけ小さくする必要がある。そのためには、使用するプリント配線板にも誘電体損失（誘電正接）が小さい材料を選択する必要がある。

つまり、高周波回路用プリント配線板材料には、
①比誘電率が一定で、しかも誘電正接が小さいこと、
②比誘電率・誘電正接が、使用雰囲気中の温度変化や吸湿などによる影響を受けにくいことが要求されることになる。

4.3 高周波特性の概要

ここで、前記したプリント配線板に求められる高周波特性について簡単に触れておく。

4.3.1 誘電正接 (tanδ)

誘電正接（誘電体損失）は、限りなく小さい（0 に近い）ことが望まれる。誘電正接（誘電体損失）が大きいとマイクロ波を吸収（減退）し、熱に変える作用が大きくなり、信号を効率よく伝送できなくなる。また、この現象は周波数が高くなるほど著しくなる。

$P_L = W \cdot \tan \delta \cdot \frac{D_0 \cdot E_0}{2}$

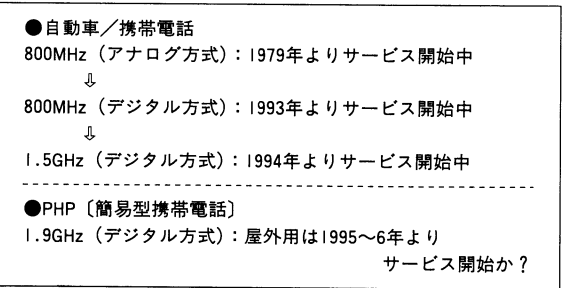


図 5. 自動車／携帯電話の使用周波数帯域の割り当て

P_L = 単位体積当たりの吸収電力

W = 角周波数 ($= 2 \pi f$)

D_0 = マイクロ波の電気変位

E_0 = マイクロ波の電界強度

4.3.2 比誘電率 (ϵ_r)

比誘電率は、真空中の誘電率 = 1 と仮定した場合に比較した物質のレベルを表す数値である。誘電正接のように小さいほど良いというものではなく、数値の大小（高低）は、それぞれ意味を持っている。例えば、高誘電率（高 ϵ_r ）の場合は後で述べる特性インピーダンス設計の関係によって、プリント配線板の小型化が可能になる。

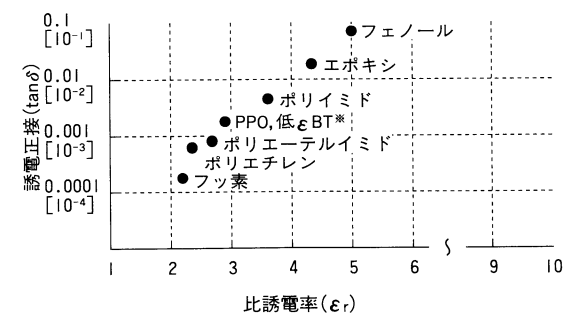
また、低誘電率（低 ϵ_r ）の場合は、前記のように信号伝播速度が速くなり、機器の高速処理化に役立っている。比誘電率 = 2.6 のガラスフッ素材料と比誘電率 = 4.9 のガラスエポキシ材料を比較すると、ガラスフッ素材料の方がガラスエポキシ材料よりも、約 40% 速い信号伝播速度を持っていることになる。

したがって、比誘電率に求められる特性は、材料自身の持つ比誘電率の絶対値がいかによらつきなく安定（一定）しているかである。ここで、ガラスフッ素材料とガラスエポキシ材料の比較を表 1 に示す。

また、各材料（樹脂単独）の比誘電率、誘電正接

表 1 . 基板の比誘電率比較
(板厚 : 0.8mm)

材料品種	誘電率 [-] : 1MHz測定, C-96/20/65	
ガラスエポキシ (FR-4)	4.70~5.10	R=0.40
ガラスフッ素	2.61~2.69	R=0.08



※三菱ガス化学資料による
図 6 . 各種材料（樹脂単独）の高周波特性

を図 6 に示す³⁾。

4.3.3 特性インピーダンス (Z_0)

特性インピーダンス (Z_0) とは、伝送線路の特性を表す定数（ベクトル量）である。高周波回路の場合は、一般的に 50Ω で設計される場合が多い。

高周波回路で安定した伝送を行うためには、特性インピーダンスを十分にコントロールする必要がある、プリント配線板としていかにばらつき（公差）を小さくするかが要求される。特性インピーダンスは一般に下記式で表される。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{4 h}{\pi \cdot W} \right]$$

L = 単位長さ当たりのインダクタンス [H/m]

C = 単位長さ当たりの 2 線間のキャパシタンス [F/m]

ϵ_r = 基板材料の比誘電率 [-]

h = 基板材料の絶縁層厚み [mm]

W = 回路幅 [mm]

最近よく耳にする「定インピーダンス」とは、プリント配線板の特性インピーダンスをできるだけ一定にしたいということであり、そのためのアプローチは上記式のとおりで、①基板材料の比誘電率のばらつきが小さいこと、②プリント配線板の絶縁層厚みのばらつきが小さいこと、③プリント配線板の回路精度（エッチング精度）のばらつきが小さいこと、等があげられる。

4.3.4 伝送損失

伝送損失とは、ある特性インピーダンスで設計された回路における単位長さ当たりの電力減衰量を表す。一般的にプリント配線板メーカーは、損失量 = 基板材料の誘電正接のイメージが強いが、高周波帯域で使用するプリント配線板の場合は、誘電正接だけでなく導体の損失量（導体損失）も併せて考慮した設計を行う必要がある（一般的には銅箔の損失量と考えてよい）。

伝送損失とは、基板材料の誘電正接と銅箔の損失を併せた損失量である。図 7 に測定試料の概要³⁾、図 8 に基板材料別に比較した伝送損失の周波数依存性³⁾を示す。ガラスエポキシ (FR-4) 材料と高周波対応材料の差が、測定周波数が高くなるにつれて大きくなっていく様子がよくわかる。

特性インピーダンス (Z_0) $\approx 50\Omega$

	比誘電率	H(mm)	W (mm)
ガラスフッ素	2.60	0.75	1.96
ガラス熱硬化低 ϵ_r PPO	3.48	0.81	1.73
ガラス熱硬化高 ϵ_r PPO	10.50	0.80	0.69
ガラスエポキシ(FR-4)	4.35	0.75	1.44

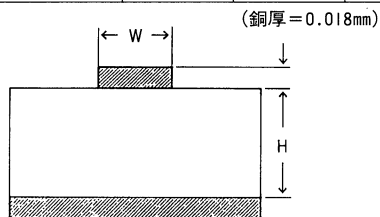
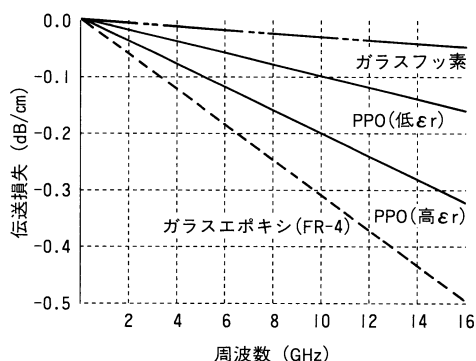


図7. 伝送損失測定試料の概要



(注)測定法等が異なるためBT樹脂は図示しない

図8. 伝送損失の周波数依存性

4.4 代表的な高周波回路用基板

ここで、現在市場で使用されている代表的な高周波回路用基板について述べる。

4.4.1 ガラスフッ素樹脂基板

フッ素樹脂は、一般的にテフロン® (デュポン社の登録商標) と呼ばれ、プリント配線板としての歴史は、それほど新しくない。軍需関連のレーダー機器等に採用されたのが最初といわれるように、有機樹脂系の基板としては、最も優秀で安定した特性を誇っている。その優れた特性のなかでも誘電正接の小ささと、吸水・吸湿の影響をほとんど受けないことが要因である高周波特性のドリフト (変化) の少なさは、他の有機樹脂系基板の追従を許さない。

フッ素樹脂は、有機樹脂系基板に使用される樹脂のなかで、非常に稀な熱可塑性樹脂である。これは、フッ素樹脂の熱軟化温度が約327°C付近ときわめて高いことによるものである。

また、加工性については一般的なガラスエポキシ樹脂基板と比較して少々異なる点がある。それは、ガラスフッ素樹脂基板が固い無機ガラスクロスと熱可塑性の柔らかいフッ素樹脂の複合構造のため、ドリル加工後の穴の内壁形状が凹凸になりやすかったり、金型やルータでの外形加工後に、ガラスクロス繊維がバリ状に残ってしまうことである。

しかし、最近ではフッ素樹脂専用のドリルビットやルータビットが商品化され、金型のクリアランスの適正化も推進されており、前記のような問題の大部分がクリアされてきている。

フッ素樹脂基板は、前記したように、一般の基板と同様に樹脂とガラスクロスから構成されているものが大部分を占めるが、Duroid® (ロジャース社) のように、ガラスクロスのかわりに無機チップ (ガラスマイクロチップ) を採用した基板もある。これは、機器の使用周波数帯域が非常に高い (30GHz 以上程度?) 宇宙関連装置や軍需機器用のプリント配線板に採用されている。基板の製造工程が特殊であり、コスト的には高価なものになっている。

また、空気誘電率 ≈ 1 を利用した発泡フッ素樹脂系の基板もある。これは、究極の低誘電率基板を実現するためのもので、フッ素樹脂単独の比誘電率 ≈ 2.1 に対して、発泡 (フッ素樹脂中に空気を含ませる) フッ素樹脂系基板の比誘電率 ≈ 1.7 程度を達成している。しかし、両面用途に必要なスルーホールめっきが採用しづらく、基材がないことによる寸法変化の不安定・機械的強度の弱さ等の欠点も抱えている。

4.4.2 ガラス熱硬化 PPO 樹脂低 ϵ_r 基板

PPO (Poly Phenylene Oxide) 樹脂は、本来、熱可塑性樹脂であるが、プリント配線板用途に耐えるべく、耐熱性向上に向け IPN 構造³⁾を導入して熱硬化型樹脂の特徴を持っている。ガラスフッ素樹脂基板に比べ高周波特性は若干劣るものの、コスト的に有利である。

また、加工性もガラスエポキシ樹脂基板と同等の工程で加工することができ、ガラスフッ素樹脂基板のみに必須な特殊なめっき前処理が不要である。

4.4.3 BT レジン基板

低 ϵ_r タイプの BT レジン基板 (三菱ガス化学)

表 2 . 一般性能比較

試験項目	単位	処理条件	フッ素樹脂	低 ϵ -PPO樹脂	高 ϵ -PPO樹脂	エポキシ樹脂
体積抵抗率	$\Omega \cdot \text{cm}$	C-96/20/65	3.6×10^{15}	6.5×10^{15}	2.6×10^{15}	4.2×10^{15}
		C-96/20/65+C-96/40/90	1.1×10^{15}	1.6×10^{15}	1.5×10^{15}	3.3×10^{15}
表面抵抗	Ω	C-96/20/65	4.6×10^{13}	3.4×10^{13}	3.6×10^{13}	2.5×10^{14}
		C-96/20/65+C-96/40/90	1.3×10^{13}	1.5×10^{12}	1.6×10^{12}	1.9×10^{13}
絶縁抵抗	Ω	C-96/20/65	3.8×10^{14}	6.9×10^{14}	4.4×10^{14}	1.0×10^{15}
		C-96/20/65+D-2/100	2.2×10^{13}	3.1×10^{13}	3.7×10^{13}	2.2×10^{14}
比誘電率 (1MHz)	—	C-96/20/65	2.66	3.58	10.49	4.91
		C-96/20/65+D-48/50	2.67	3.59	10.51	4.95
誘電正接 (1MHz)	—	C-96/20/65	0.0004	0.0019	0.0021	0.0178
		C-96/20/65+D-48/50	0.0005	0.0027	0.0029	0.0196
比誘電率 (2GHz)	—	C-96/20/65	2.60	3.45	10.55	—
誘電正接 (2GHz)	—	C-96/20/65	0.0007	0.0032	0.0035	—
はんだ耐熱性	秒	A (260°C)	120以上	120以上	120以上	120以上
銅箔引きはがし強さ	kg/cm	A (18 μ)	1.3	1.2	1.1	1.4
吸水率	%	E-24/50+D-24/23	0.02	0.32	0.29	0.16
難燃性	—	AおよびE-168/70	94V-0	94HB	—	94V-0

は、前記、ガラス熱硬化 PPO 樹脂低 ϵ_r 基板と比較し、高周波特性上ほぼ同様の数値を示す上、いち早く多層基板を実現したところに特徴がある。レジン組成、ガラスクロスとの組み合わせで数種類が上市されており、詳細については本誌サーキットテクノロジー、Vol. 9, No2, 1994年3月号の基礎講座「基板材料」第8回 BT レジン：金原秀憲氏著を参照いただきたい。

4.4.4 ガラス熱硬化 PPO 樹脂高 ϵ_r 基板

従来、高 ϵ_r 基板といえば、無機のセラミック基板かあるいはアメリカ製のフッ素樹脂高 ϵ_r 基板が、その代表である。しかし、セラミック基板はプリント配線板加工工程が特殊であり、一般のプリント配線板加工メーカーが現有設備で生産できるものではない。しかも、少品種大量生産には向くが、多品種少量生産には生産性・コスト的に不利な点があるといわれている。

また、フッ素樹脂高 ϵ_r 基板には、ガラスクロスとの代わりにガラスチップや微細な無機材料を使用する特殊な製法で生産しているものもあるが、前述のようにスルーホールめっき加工において特殊な前処理が必要である。

ガラス熱硬化 PPO 樹脂高 ϵ_r 基板は、PPO 樹脂低 ϵ_r 基板をベースにガラスクロスに誘電率が大きな H ガラス*1を適用して、さらに高 ϵ_r の微細な無機材料を使用したことで、高 ϵ_r 基板化を実現している。誘電正接も、PPO 樹脂低 ϵ_r 基板並の特性を保有しており、小型化が可能な高 ϵ_r と高周波回路用基板に必要な低誘電正接の両方を兼ね備えた基板である。

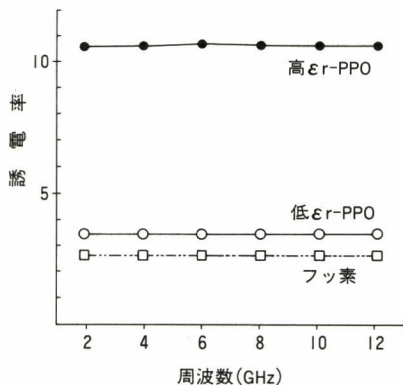
以上、代表的な高周波回路用基板の一般特性を表2に、比誘電率の周波数依存性を図9に、誘電正接の周波数依存性を図10に示す。

5. おわりに

高周波回路用プリント配線板材料について述べてきたが、無線関連機器を中心とした既存機器には、すでにこれらの基板が多数使用されている。

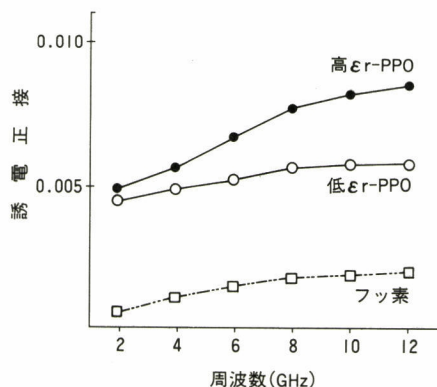
今後、ますます活発に推進されるであろう無線関連機器の商品開発のためには、高周波回路用プリント配線板材料の①さらなる高周波特性向上、②基板コストの低減、③加工生産性の向上、等が重要なポ

脚注 ※1：京都大学、日本電気硝子、松下電工の3者で共同開発した高比誘電率ガラスクロス。



(注)測定法等が異なるためBT樹脂は図示しない

図9. 比誘電率の周波数依存性



(注)測定法等が異なるためBT樹脂は図示しない

図10. 誘電正接の周波数依存性

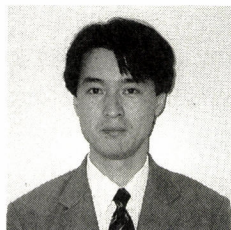
イントであるといっても過言ではない。

したがって、上記重要ポイントを満足させるためにも基板材料技術・プリント配線板加工技術・回路設計技術等の各専門分野の連携融合が期待される。

(1994.2.21-受理)

文 献

- 1) 吉光時夫：“プリント配線板材料”，日刊工業新聞社，第11章，p.97，(1994)
- 2) 通信機械工業会調査資料より引用。
- 3) 吉光時夫：“プリント配線板材料”，日刊工業新聞社，第11章，pp.101～105，(1994)



平川 勝利（ひらかわ かつとし）
昭和39年生まれ。昭和60年，佐世保工業高等専門学校工業化学科卒業。松下電工株式会社電子基材事業部において高周波対応銅張積層板の商品開発・製造技術開発に携わり，現在，市場開発に従事。