

高周波対応に向けたFPC・ 周辺材料の現状と展開

長岡技術科学大学 ^{Kawai Akira}
河合 晃

大学院 電気電子情報工学専攻 教授 博士(工学)
〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1

高周波通信におけるFPCの重要性

わが国の移動通信システムは、1980年代の1Gから2020年代の5Gに至るまで、10年ごとに進化し、表1にあるように30年間で約10万倍の最大通信速度の増加を実現した。高速通信技術は我々の生活環境を変えるだけでなく、自然災害に対しても有効な情報管理手段として重要である。また、近年のIoT(Internet of Things)に向けた機能性デバイスおよびモバイル機器の需要が急増する見込みであり、高周波対応のプリント基板技術の機能性向上やプロセス技術の最適化が強く求められている。高周波通信技術の中では、通信インフラや信号処理技術が注目されがちであるが、これらを支える材料技術の発展の寄与が大きいことは言うまでもない。5G化の流れにより、GHzクラスの高周波シグナルを取り扱うためには、プリント基板材料の低誘電率化と低誘電正接化が必須となる。高周波通信に要求される主な技術としては、

(1)最大10Gbpsの超高速通信、(2)1ミリ秒程度の超低遅延、(3)100万台/km²が可能な多数同時接続が代表的である。これらの要求技術には、単なる超高速だけではなく、超低遅延と多数同時接続によるネットワーク要件を備えていることが必須となる。また、すべてのモノがインターネットに接続されるIoT社会の実現にも不可欠なインフラと言える。超高速としては、近年の高精細技術である4Kや8K映像なども超高速に伝送が可能であることが求められる。超低遅延としては、自動運転や遠隔ロボット操作などのリアルタイム操作や高機能・即応性のIoT技術などが挙げられる。多数同時接続としては、テレワークなどの狭いエリアでの業務や会議進行、スマートメータ搭載のインフラ維持管理などが考えられる。これ以外にも、多くの応用分野が対象となり、期待の大きい技術革新と言える。

表1 移動通信システムの歴史

1G	1980年代	アナログ携帯電話の普及	アナログ通信
2G	1990年代	メール・インターネットの普及	デジタル通信 2.4kbps~28.8kbps
3G	2000年代	「3G」高速通信の普及	通信速度の向上 384kbps~14Mbps
4G	2010年代	スマートフォンのためのモバイルネットワーク技術	50Mbps~1Gbps
5G	2020年代	社会を支えるモバイルネットワーク技術	高速大容量 IoT対応



図1 FR-4ベースのプリント基板

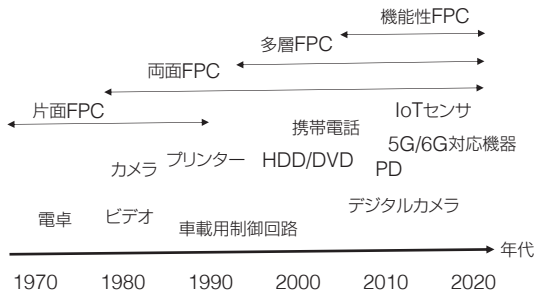


図2 FPCの用途

このような時代の流れにおいて、数多くの電子部品を搭載し電子回路としての機能性を発揮するためには、プリント基板は不可欠である^{1)~7)}。プリント基板技術としては、図1のようなリジッドなガラエポ材を基本としたFR4基板が主流となってきた。プリント基板には、抵抗素子やコンデンサなどの受動素子やトランジスタなどの能動素子がマウントされており、端子部ははんだ付けされている。しかしながら、IoT技術の急速な発展に伴い、繰り返し屈曲性に富んだFPC(Flexible Printed Circuit)基板の重要性が増している。従来、FPCは、リジッドなプリント基板間の接続(ヒンジ部)として用いられており、振動を伴う車載用や可動部を伴うハードディスクドライブ(HDD)や携帯電話およびデジタルカメラなどの内部配線では必須の技術であった。しかし、図2のように、時代とともにその用途も飛躍的に拡大しつつある。FPCは部品実装機能、ケーブル機能、コネクタ機能といった多機能性を有している。また、FPC基板はポリイミド(PI)などの耐熱材料を採用しているため、ソルダリングによる部品実装が可能である。特に、IoTの必須アイテムである機能性センサシステムなどでは、自在に変形できるFPCのニーズは高まっている。

FPCの基本構造

FPCはPI膜に銅箔を接着した屈曲性のあるFCCL(Flexible Copper Clad Laminate)構造を基本としており、片面、両面、多層FPCなどが普及している。図3には、FPCの基本構造を示している。主なプロセス技術としては、銅薄層をエッチングすることで回路を形成し、両面をPI膜で挟んで

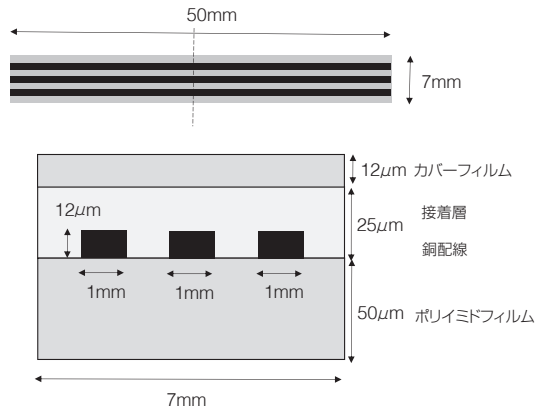


図3 FPCの基本構造

接着剤で接着する。その後、ビアホールを形成する。銅箔には圧延銅や電解銅などが用いられるが、安価で表面の平滑性に優れた電解銅が用いられている。しかし、耐久性に対する銅配線の破断を考慮すると、破断面に直行方向に結晶配列を有する圧延銅が優れている。FPCの絶縁層には200℃以上の耐熱性を有するPI膜が用いられる。PI膜は屈曲性や引張り荷重にも高い耐性を有している。PI膜にはカプトンやアピカルが多く用いられている。特定分野にはユープレックスなどが用いられており、一般向けにはSKCコーロンやタイマイトなども多く用いられている。各層の熱膨張係数は、銅箔の $16.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の近傍に設計されており、加熱時の界面歪みを最低限にしている。銅の弾性率は130GPaであり、PI層が8GPa程度である。繰り返し屈曲試験時には銅配線よりもPI層が先に破断してくる。今後の高周波対応として、液晶ポリマー(LCP)PEN膜の適用も進んでいる。PI層の膜厚は、12.5 μm および25 μm が主である。銅箔は12 μm ~35 μm 厚を用いることが多い。これらの材料厚みはFPCの屈曲耐性に大きく影響する。

FPC用材料における低誘電性、低誘電正接

プリント基板を構成する誘電体中の信号伝達速度を考察する。一般に、誘電体中では比誘電率の増加に伴って、信号の伝搬速度 v は大気中に比べて低下する。これらの特性は式(1)で表される。式中で ϵ_r は比誘電率、 C は光速、 K は定数である。よって、FPCにおいても誘電率を低くすれば伝

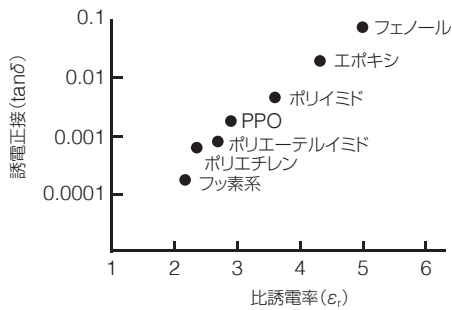


図4 プリント基板材料の誘電性

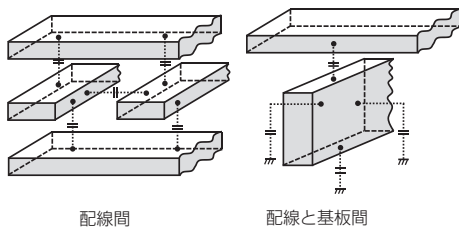


図6 プリント基板中の浮遊容量

搬速度も高くなる。すなわち、5Gでは30GHz程度の高周波通信となるため、回路の信号伝達速度を高める必要があることから、FPCおよびプリント基板全体の誘電材料として低誘電率材料が求められる。また、式(2)にあるように信号の減衰量は誘電正接($\tan \delta$)に比例する。 P_L は単位体積当たりの吸収電力、 W は角周波数($=2\pi f$)、 D_0 はマイクロ波の電気変位、 E_0 はマイクロ波の電界強度を表す。信号の減衰量はそのまま発熱となり、FPCおよびプリント基板パッケージの温度上昇を引き起こす。よって、プリント基板材料の誘電正接の低下が重要となる。5G以降の世代においては、FPCおよびプリント基板を構成する材料の比誘電率は2.5以下、および、比誘電正接は0.001以下が要求される。

$$v = K \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

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

以上のように、高周波対応のプリント基板材料として、低誘電率および低誘電正接が必要となる。図4には、代表的なプリント基板材料の誘電特性パラメータをまとめている。リジッドな基板材料として、フェノール樹脂やエポキシ樹脂が用い

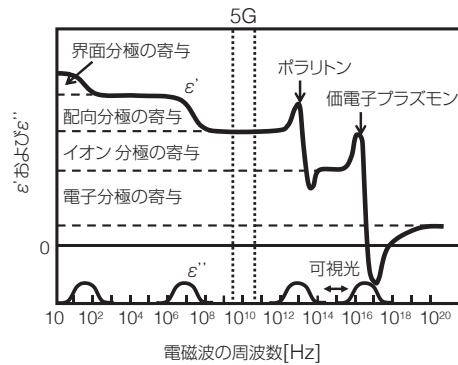


図5 誘電率の周波数特性

られてきたが、比誘電率や誘電正接ともに高い値である。後述するが、誘電率は素材の凝集性と正の相関があり、これらの基板は剛性が高く、プリント基板として回路素子を保持する役割を十分に果たしている。しかし、FPC材料として、PIやフッ素系樹脂および液晶ポリマーは、ともに比誘電率や誘電正接が低く、高周波対応の基板素材としても有望である。ただ、基板としての強度は低いため、リジッド基板のような多くの素子を搭載する用途には限界がある。図5は誘電体の周波数分散特性を示している。誘電体中の双極子は外部交流電界によって分極方向を反転させるが、高周波になるにつれて追従性が低下する。この現象を誘電緩和と呼ぶが、この時に誘電損失が生じ発熱の要因となる。誘電正接 $\tan \delta$ は、誘電率と誘電損失の比として定義され、損失分を誘電率で規格化したパラメータとして理解できる。分極の種類は双極子サイズに伴い、界面分極、配向分極、イオン分極、電子分極があるが、サイズの大きい順に緩和が進んでいく。5Gとしては図中の領域となるが、これまでの配向分極の寄与は減少し、イオン分極性が高くなっていく。そのため、プリント基板材料の分子設計においても、誘電緩和の面で従来と異なる方向性が求められる。

図6はFPC内の配線間に生じる浮遊容量の概念図である。銅配線間には幾何学的な位置関係に基づく静電容量が生じる。これを浮遊容量と呼ぶが、低周波領域では影響を及ぼさない。しかし、高周波になると浮遊容量に基づく交流インピーダンスが低下し、シグナルの一部である高周波成分