

第1節 5G高度化と6Gで求められる高分子材料の技術動向と 応用に向けての材料設計

横浜国立大学 横浜市立大学 高橋 昭雄

はじめに

2019年から2020年にかけて適用が開始された通信規格5Gは、IoTやビッグデータ、AIそしてロボットの発展により Society 5.0/ 第4次産業革命の中核を形成しつつある。さらに、図1に示す5G高度化と2030年頃に予想される6Gが、バイオテクノロジーを駆使したスマートセルインダストリーを取り込む第5次産業革命へと発展することが予想される^{1,3)}。通信規格5G, IoT, ビッグデータ, AI, ロボット, 自動運転を現実化しているのは、高周波デバイスが駆使されるスマートセル基地局、そして5G対応のスマートフォン、スマートウォッチ、ドローン等のエッジデバイスである。さらに図2に示すデータセンターで使用されるメインフレーム、ミニコンピュータ、サーバ等の各種コンピュータや端末機器の飛躍的な高機能化と高性能化である⁴⁾。

これらのエレクトロニクス機器には、配線ルールで5 nmを確立している最先端の半導体チップが採用される。本節では、半導体チップが搭載される実装基板に主材として適用されている高分子材料の技術動向と応用に向けての材料設計について概説する。

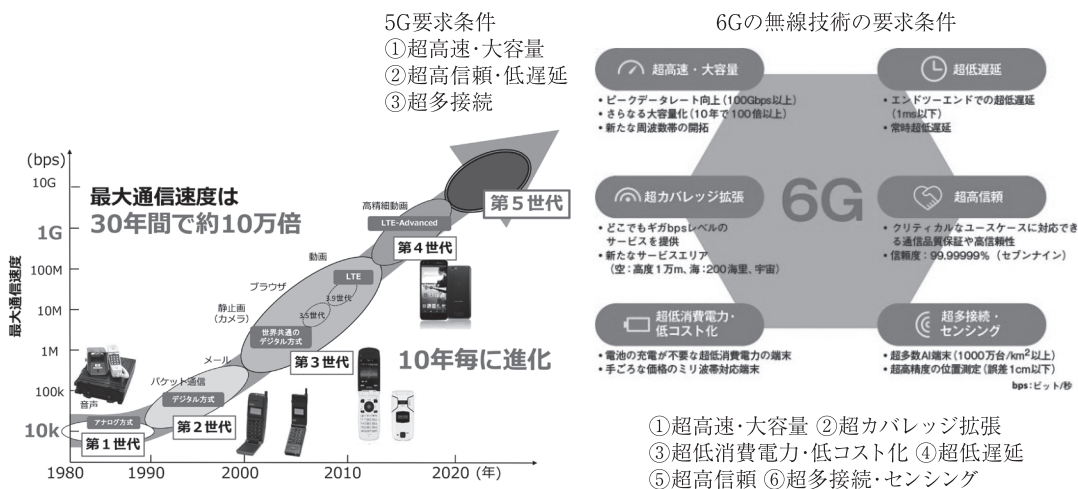


図1 移動通信システムの進化(第1世代~第6世代)^{1,2)}

第1節 低誘電特性および高耐熱・高接着性を有する エポキシ樹脂の開発

三菱ケミカル(株) 木田 紀行 高橋 淳

はじめに

エポキシ樹脂は、その高い接着性や電気絶縁性、架橋性高分子であることに由来する種々の特徴的な機械物性を有しており、半導体封止材や回路基板などのエレクトロニクス実装材料向けの素材として欠かせない存在である¹⁾。

エレクトロニクス実装材料の近年の動向として、次世代・次々世代の高速通信ネットワークやビッグデータの高速処理を指向した電気信号の高周波数化への対応が強く求められている。筆頭にあがるのが低誘電特性であり、特に低誘電正接が非常に重要視される傾向にある。

1. 低誘電エポキシ樹脂開発のモチベーション

こうした流れの中で、フッ素樹脂、液晶ポリマー、マレイミド、ポリフェニレンエーテルなど、従来のエポキシ樹脂以外の材料の適用検討が盛んである^{2,3)}。しかしこれらの樹脂も、誘電特性(低誘電正接)には優れるものの、加工性や接着性には課題が指摘されており⁴⁾、特に基板の多層化や配線の微細化への対応において十分とはいえない状況にある。メーカー各社はこれらの課題を克服すべく、様々な工夫を凝らしている。

一方で、エポキシ樹脂は元々誘電特性がそれほど良好な材料ではないが、そのハンドリングのよさと高い接着性や絶縁信頼性、そして配合によって機械物性のファインチューニングが可能であるという特徴から、精度の高い微細配線が要求されるパッケージ基板においては現在でも主流の樹脂材料である。とはいえ、この分野でも高周波数化は進んでおり、また配線微細化によってわずかな寄生容量や信号遅延も無視できなくなってきたことから、低誘電特性の要求が近年非常に強くなってきた。

図1に、筆者らが目指すエポキシ樹脂の開発方向を示す。本節では、エポキシ樹脂が本来有する加工性・接着性などの特性を可能な限り維持したまま、どこまで低誘電化が可能かに挑戦した結果を、いくつかの開発事例を交えて解説したい。

第4節 高速伝送FPC用ベースフィルム材：変性ポリイミド

東邦大学 長谷川 匡俊

1. FPCに適した電気絶縁樹脂材料

一般に、有機高分子材料は電気絶縁性、塗工・製膜性(溶液加工性)、熱成型加工性および柔軟性(可撓性)といった電子機器等における回路の電気絶縁に適した特性を有する。しかし、回路と各種電子部品との電氣的接続のため、回路基板用絶縁樹脂には多くの場合、ハンダ耐熱性(260℃でのハンダリフロー工程適合性)が必要である。図1に代表的な耐熱樹脂の分子構造を示す。ハンダリフロー温度でもびくともしない(軟化・熔融や熱分解しない)実用的な耐熱性樹脂には全芳香族ポリイミド(PI)、ポリベンズアゾール、全芳香族ポリアミド(アラミド)がある。これらに比べると、工業化されている熱・溶液加工性芳香族ポリアリレートは耐熱性が低い。また、ポリアゾメチンは熱・溶液加工性に乏しく、今のところ実用化されていない。

入手の自由度が比較的大きい芳香族ジカルボン酸と芳香族ジアミンから得られるアラミドは通常、有機溶媒溶解性に乏しいが、濃硫酸溶液から製膜する方法が開発され、高耐熱性、超低熱膨張性および超高弾性率の高性能フィルムが上市されている¹⁾。アラミドは塩化(または臭化)リチウムを含むアミド系溶媒(*N*-Methyl-2-pyrrolidone : NMP等)には溶解性を示すが、リチウム塩を含まない純粋な有機溶媒には溶解しないため、一旦ワニスとしこれを塗工して絶縁層を形成する目的には不向きである。

ポリベンズアゾールには、ポリベンゾオキサゾール(PBO)、ポリベンズイミダゾール(PBI)およびポリベンズチアゾール(PBT)があり(図1)、これらはPIに匹敵する超耐熱性を有する。PBOとPBTは有機溶媒に不溶であるが²⁾、PBIはアミド系溶媒に溶解性を示すものも上市されており、ワニスを塗工して高性能なフィルムを形成できる^{3,4)}。図1に示すように、PBIとPBTは、入手可能なモノマー(それぞれ、テトラアミンおよびBis(*o*-aminothiophenol))がかなり限られているため、分子構造の変更・修飾の自由度に乏しく、今のところエレクトロニクス分野へ広く適用されていない。PBOは、PBIやPBTに次いで入手可能なモノマー(Bis(*o*-aminophenol))が限られているが、現在、防弾チョッキや消防服用の高難燃性の高強度・高弾性率繊維⁵⁾や半導体素子のバッファコート膜用ポジ型感光性樹脂組成物⁶⁾へ利用されている。後者で用いられるPBOの前駆体(ポリヒドロキシアミド(PHA))は、フェノール性OH基を含んでおり、半導体用レジストの標準有機アルカリ現像液(2.38%テトラメチルアンモニウ

第7節 汎用型から誘電正接を1/2以下に制御した 低誘電LCPの開発とその用途展開

ENEOS(株) 鷲野 豪介 登 優美子

1. GHz以上の高周波帯でニーズが高まる低誘電性と注目される液晶ポリマー

情報通信分野では、より密度の高い情報をより高速に伝達することが一貫した開発トレンドとなっている。このトレンドを実現する基本方針は高周波電波の利用で、2022年現在では数十から百GHz程度の周波数帯の検討が活発化しており、検討周波数のさらなる高周波化は今後とも継続していく見通しである。通信のための電波は電子基板を信号として流れるが、この周波数が高いほど基板伝送過程での減衰程度が大きくなる性質を持ち、ひどい場合ではデバイス間での誤認識、通信の途絶につながる。ゆえに高速通信の信頼性を担保するためにデバイス設計上の対策が必要となり、その一つとして低伝送損失な材料の選定がある。伝送損失はデバイスを構成する導体と絶縁体、それぞれでの電気エネルギー損失の和で表され¹⁾、これらのうち二桁GHz以降の周波数帯では絶縁体での誘電損失が伝送損失の主要因になる²⁾とされる。誘電損失を低減するには絶縁体の比誘電率(Dk)と誘電正接(Df)という誘電特性の二つの物性をともに小さくすることが有効であり、これらの物性値が低い「低誘電」材料が求められている。ただし誘電損失の理論式は式(1)で表せられるため¹⁾、誘電損失を低減するためには一乗オーダーで寄与するDfを低下させることがより効果的である。基板分野の絶縁材料として使われる汎用ポリイミド(PI)のDk 3.5~4.0、Df 1×10^{-2} 程度に対し、最も低誘電な材料の一つとされるPTFEを含むフッ素系ポリマーはDk 2.0~2.5、Df $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ である³⁾。よって、材料間のDfの値の差は数桁レベルであり、Dkの値の差より十分に大きく、誘電損失への寄与も大きいDfこそ誘電損失の低減のために制御すべき物性であるといえる。

$$\text{誘電損失} \propto \sqrt{Dk} \times Df \times \text{周波数} \quad (1)$$

芳香族ポリエステル/アミド型の液晶ポリマー(LCP)は加熱によって液晶相を発現するポリマーの総称で、この性質を満たせばLCPと分類される。ゆえに多種多様な分子設計のLCPが工業化されているが、最も代表的なLCPである*p*-ヒドロキシ安息香酸(HBA)と6-ヒドロキシ-2-ナフトエ酸(HNA)からなるLCP(mol比でHBA:HNA = 73:27)のニートレジンでDk = 3.5、Df = 2.0×10^{-3} であり^(注)、PIなどの汎用材料と比べDk、特にDfが小さいため低誘電材料とし

(注)：10 GHz、室温におけるSPDR(スプリットポスト)共振法⁴⁾による材料の面内方向平均の値。以下、注釈のない誘電特性数値はこの測定法による値を使用する。

第11節 高機能ポリフェニレンサルファイドフィルムの開発と 高周波基板材料への応用

東レ(株) 前川 茂俊

はじめに

現在、第5世代移動通信システム(5G)のサービスは、高速、大容量、多数の同時アクセス、低遅延を可能にする次世代通信技術として普及が進んでおり、5Gネットワークの人口カバー率が急ピッチで拡大している。5Gでは、従来使用されている6 GHz以下の周波数帯域に加え、20 GHz以上の高周波数帯域での通信が必要となる。このため、5Gに必要なFPCを構成する基板材料には、高周波数帯での通信に適した誘電特性と半導体実装に耐えられるだけの耐熱性や銅配線との密着性を備えた新たな材料が求められている。

高周波数帯の通信に使用される伝送回路では、絶縁材料起因の誘電損失と導電体起因の導体損失からなる伝送損失によって信号の品質の低下を招く。誘電損失は絶縁材料の誘電正接に比例するため、誘電正接の小さな材料が求められる¹⁾。

現在、誘電正接が小さな液晶ポリマ(LCP)フィルムや変性ポリイミド(MPI)フィルムが実用化されているが、加工性や耐湿性の課題があり、さらに新たな素材の参入が期待されている。

1. PPSフィルム トレリナ[®]の特徴

ポリフェニレンサルファイド(PPS)はベンゼン環とイオウ原子の繰り返しからなるポリマで、耐熱性、難燃性、耐薬品性、電気絶縁性など数々の優れた特徴をバランスよく備えたスーパーエンジニア

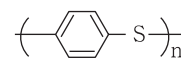


図1 PPSの構造式

リングプラスチックである(図1)。PPSは1970年代にPhilips Petroleum社によりはじめて工業化された。同社が開発した重合方法はPhilips法と呼ばれ、アミド系極性溶媒中でジクロロベンゼンを硫化アルカリと高温高圧下で縮重合反応させる方法である²⁾。現在工業化されているPPS樹脂は上記の重合方法に基づくものが大多数である。PPS樹脂は上記の特性を生かして、射出・押出などの各種成形用途に幅広く用いられている。PPS樹脂を用いたフィルムは、靱性などの必要特性を保って薄膜化するため、製膜工程において結晶構造の精密制御が必要であることから技術的なハードルが高く、いち早く当社がトレリナ[®]ブランドとして工業化に成功している。

第12節 1,2-PB 及び1,2-SBS の特性と高周波基板用 CCL への応用

日本曹達(株) 橋本 裕輝

はじめに

CCL(銅張積層板)の中でも通信向け用途の要求特性が高まっている。特に第5世代通信(5G通信)向け高周波基板用CCLに求められる材料は、精密にデザインされたポリマー類を必要としている。1,2-ビニル基を有するポリブタジエンユニットはこれらを満たす構造である。熱硬化した1,2-ビニル基は、低誘電、耐熱性、銅箔密着性に有利に働く。また、フェニルユニットは銅箔との密着性に必要である。これらより、先端の高周波基板用CCL向け材料には、1,2-ビニル基を含有する1,2-PB(ポリブタジエン)や1,2-SBS(スチレン/ブタジエン/スチレン共重合体)が使用されている。

本節ではCCL材料に求められる材料を解析し、1,2-PB、1,2-SBSの使用例を示しながら効果を論じていく。

1. CCLの技術背景

2020年から5G通信が立ち上がり、プリント基板(PCB: Printed Circuit Board)の要求性能は一段と高まっている。5G通信が本格的に実用面で寄与するのは自動車の自動運転の到来時である。2022年段階ではまだ実用に達していないが、開発が進んでおり、2025年には自動運転が本格的に導入される見込みである。それに合わせ、劇的に通信インフラが整備され、これまで想像もできなかったような身の回りの自動化や、遠隔操作が実現する。これらを可能にするための5G通信向けCCLには、5G通信の特徴である下記の3点に対応する材料特性が必須である。

- ・超高速通信
- ・大容量通信
- ・多数同時接続(低干渉)

PCBの性能は構成される銅張積層板(CCL)に大きく依存している。CCLはガラス繊維等を樹脂、モノマー類に含浸させて加圧、加熱処理した樹脂層の両面に銅箔を貼り合わせた板である(図1)。

第13節 他基材との接着性・分散性に優れたフッ素樹脂の開発と 高速高周波用プリントへの展開

AGC(株) 細田 朋也

1. フッ素樹脂とプリント基板用材料

フッ素樹脂は、その高分子鎖の中に含まれるフッ素原子の数による分類と、単重合、共重合による分類の方法があり、それぞれ独自の性質が生じる。フッ素樹脂の中でもプリント基板用材料として有望なものは、フッ素含有量が多いパーフルオロ樹脂である。パーフルオロ樹脂の中には、PTFE、PFA、FEPといった樹脂が含まれる。フッ素含有量が多いと誘電特性や耐熱性が優れた樹脂となる¹⁾。

パーフルオロ樹脂は柔軟で粘り強く、その表面不活性な物性から、離型性もよい。一方でこれらの特性はプリント基板用材料という観点からは不利な条件であり、柔軟性＝低剛性を補うためにガラスクロスなどへ含浸したり、離型性＝低接着性を補うために物理的な凹凸の大きい、いわゆる粗い銅箔を使用することが必要となる。

また、パーフルオロ樹脂を粉体として、フィラーとして活用する際にも、表面不活性な特性から、非常に分散のしにくい、つまり凝集しやすい特性を持っている。

5Gのミリ波帯活用においては、従来の基板では伝送損失や挿入損失が非常に大きくなる。そのため、それに関わるプリント基板用材料も重要となってくる²⁾。特にプリント基板用材料の中でも高周波信号の伝送損失が小さい低損失材料が注目を浴びている。このような状況下、多くの基板メーカーが低損失材料の評価を行っており、低損失材料の中でもフッ素系材料、特にフッ素樹脂が比誘電率と誘電正接が小さい材料として知られている。一方でフッ素樹脂は機械特性の観点から、基板材料としての要求を満たすには、他材料との複合化が必須である。しかし従来のフッ素樹脂はその不活性な性質から、他材料との接着、分散などの複合化が困難であり、回路基板としては一部の用途への適用に限られていた。

このような中で、当社は長年のフッ素樹脂の合成、製造技術を生かし、このパーフルオロ樹脂の一種に改質を加え、パーフルオロ樹脂の特性を生かしつつも高度な接着性と分散性を付与した、Fluon + TM EA-2000(以下EA-2000)を上市している³⁾。EA-2000は、柔軟性＝低剛性こそパーフルオロ樹脂の特性が維持されているが、改質により、高い接着性と分散性を付与されている。そのため、金属基材と有機基材の接着層や、有機基材への低誘電添加剤として好適に使用することが可能である(図1)。

第15節 低粗度銅箔・低誘電性基材に対応する FPC用接着剤フィルムの開発

東亜合成(株) 近藤 貴弘

はじめに

昨今、第5世代移動通信システムである5Gが注目されている。通信速度は1980年代にサービスが開始されたアナログ方式(1G)から30年間で約10万倍高速化し、5Gでは10 Gbpsの超高速通信を可能とする。5Gは超高速通信の他、超低遅延、多数同時接続なども実現でき、医療、介護、工事現場、生産現場、マーケティングなどあらゆる分野へ拡大されていく¹⁾。これを実現するために、5Gにおいて電気信号はこれまでより高周波であるSub6帯と呼ばれる3.7 GHz帯、4.5 GHz帯やミリ波帯と呼ばれる28 GHz帯が使用されており、ミリ波帯については今後さらなる高周波帯が使用される。さらに、2030年には次の世代のBeyond 5Gいわゆる6Gについての導入が見込まれ、100 GHz以上のテラヘルツ波の利用も検討されている²⁾。

このように将来の情報通信には、高周波帯の電気信号を扱うことが必要不可欠であるが、一方で、電気信号を高周波化することで回路基板の伝送損失が増大し、信号のエネルギーが減衰するというデメリットがある。ここで、伝送損失は導体損失と誘電損失に大別される(式(1))。導体損失は回路基板の配線の抵抗に起因する損失であり(式(2))、伝送距離が長くなるほど増加する。高周波帯の電気信号は配線の最表面を伝送するため、配線に用いられる銅箔の表面粗さが大きいほど伝送距離が長くなる。そのため、高周波帯の信号を伝送する際は導体損失を低減するため、銅箔の表面粗さが小さい低粗度銅箔が用いられる。一方、誘電損失は回路基板の樹脂基材の誘電特性(誘電率/誘電正接)に起因する損失である。一般的に電気信号が高周波になるほど誘電損失は増加し、誘電率/誘電正接が大きいほど誘電損失が大きくなる(式(3))。そのため、高周波帯の電気信号を伝送する際は低誘電率/低誘電正接の樹脂基材である低誘電性基材が用いられる。

$$\text{伝送損失} = \text{導体損失} + \text{誘電損失} \quad (1)$$

$$\text{導体損失} \propto R \times \sqrt{f} \quad (2)$$

$$\text{誘電損失} \propto f \times Df \times \sqrt{Dk} \quad (3)$$

R: 導体抵抗 Dk: 誘電率 Df: 誘電正接 f: 周波数

はじめに

本章では高周波対応基板材料の誘電率測定・評価技術について述べる。一般に、マイクロ波～ミリ波帯の誘電率を測定する方法としては反射伝送法と共振器法があるが、低損失の基板材料の測定には共振器法が用いられる。共振器法の概論を述べたのちに、ミリ波帯を含む超広帯域での測定が可能な平衡型円板共振器法について説明し、最後に同方法の導電率測定への展開について述べる。

1. 背景

近年、高速大容量の無線通信を可能にするミリ波帯電磁波の利用が拡大している。2020年3月より日本でも5G(第5世代移動通信システム)の商用サービスが開始されたが、日本では5G用の周波数としてすでに28 GHz帯などが割り当てられ、最大で71 GHzまでの割り当てが国際的に合意されている¹⁾。通信インフラとして5Gの事業化が進む一方で、ポスト5Gや次世代の6G(第6世代移動通信システム)の研究開発も開始されている。6G無線通信の世界やサービスの議論は始まっており、ネットワークの仕様や情報セキュリティなどの技術についても検討が進められている。現在までに、6Gに関する標準化のロードマップが示されており(図1)、2030年頃のサービス開始に向けて、広範な技術分野でのデバイス・システムの研究開発が全世界的に進められている。

6Gでは5G以上の高速大容量通信を実現するために100 GHz超の周波数の電磁波の利用が見込まれる³⁾。しかし、一般に回路の消費電力を左右する伝送損失は周波数が高くなるほど増大するため、6Gの実現にはデバイス・回路の高性能化と低損失化を可能とする材料開発が強く求められている。6Gの実用化に寄与する材料・製造技術を日本が先駆けて実現できれば、6Gにおいて日本が主導することが可能となる。6Gに向けた材料・製造技術の開発を牽引するために、産業技術総合研究所では100 GHz超に対応する材料・製造技術の研究開発の方向性を示すことを目的としたスペックロードマップを提示した⁴⁾。

第1節 国内外における Beyond 5G/6G 研究開発などの動向

(株) 情報通信総合研究所 清水 郁雄

はじめに

5G(第5世代移動通信システム)は、2019年4月に米国・韓国でスマートフォン向けのサービスが開始された。モバイル関連の業界団体GSMAのレポート(The Mobile Economy 2022)¹⁾によると、世界の70ヵ国で5G商用ネットワークが運用されており(2021年12月末時点)、2020年にラテンアメリカおよびサハラ以南のアフリカでサービスを開始したことで、現在、世界のすべての地域で5Gが利用可能となっている。世界の5G展開は、新型コロナウイルスの影響で一旦停滞したものの、ロックダウンを契機とした通信需要の急増や非対面のソリューション需要(在宅勤務、遠隔教育、遠隔医療など)の顕在化を受けて、今後の加速が期待される。また、5Gの展開を機に、通信事業者による大手クラウド事業者との提携や、ネットワークのオープン化(Open RAN)・仮想化(virtual RAN)の取り組みが進展している。

一方で、2028～2030年に実用化が見込まれるBeyond 5G/6Gについては、主要国・地域における研究開発に加えて、近時、政府主導で国際連携を図る動きが活発化している。日米両国は、2021年4月に「日米競争力・強靱性(コア)パートナーシップ」²⁾を立ち上げ、5GおよびBeyond 5G/6Gを含む安全なネットワーク、先端的なICTの研究開発などに、共同で合計45億米ドル(約5,500億円)を投資することに合意した。また、米国と韓国は、2021年5月に、5G、Open RAN、次世代ネットワーク(6G)などの新技術において、イノベーションを先導することに合意³⁾した。

本節では、5Gの先行市場(米国、韓国、欧州、中国、日本)における展開状況を概観した上で、国内外におけるBeyond 5G/6Gに向けた研究開発などの動向を概説する。

1. 5Gの展開状況

GSMAのレポートによると、5G接続端末数は米国、韓国、中国などで急速に増加し、2022年に世界で10億台に達する見込みである。現在は世界における全モバイル接続の約60%を占める4Gが主流であるが、2025年末には5Gは4分の1を占め、先行市場においては過半数を占めるとみられている。また、5G導入を機にデジタルディバイド(情報格差)の解消を図る動きがあり、新興国においてもOpen RAN(オープンな無線アクセスネットワーク)の活用によるネッ

第2節 Beyond 5G(6G) に求められる機能・部品材料の技術動向

(特非) サーキットネットワーク 梶田 栄

はじめに

移動体通信システムは、セルラー方式の自動車電話のサービスが世界ではじめて1979年に日本ではじまって以来40年を経過し、その間通信方式はアナログ方式からデジタル方式へと進化してきた。携帯電話は単なるコミュニケーションツールであった単機能機から大量の情報を扱うことができるスマートフォンへと変わり、社会生活や産業に欠かせない社会基盤の一つになった。アナログ方式の時代を第一世代(1G:1st generation)と呼び、デジタル化がはじまった時を第二世代(2G)と呼んでいる。さらにデジタル変調方式がW-CDMA方式となった時を第三世代(3G)と呼び、現在主流となっているLTE(Long Term Evolution)方式が第四世代(4G)である。2G以降の主な仕様の進化点はデータ通信速度の高速化である。2Gでは通信速度は28.8 kbps(bit per second)でありメールを利用する程度であったのが、次第に写真などを送るようになるとデータ通信速度が不十分なため利用者に不便を感じさせるようになり、通信速度をkbpsレベルからMbpsレベルへと大きく進展させた。通信速度が速くなるに従いYouTubeなどの動画やSNS(Social Network Service)が広まり、再び通信速度の不満が出てきた。そこで4Gが登場し通信速度に関してひとまず落ち着いてきたように見えたが、通信で決済をしたりする電子決済システムが普及し通信の信頼性が問われるようになってきた。産業界でも移動体通信を多用するようになり、主要な社会基盤の一つとなってきた。そのため通信品質の向上や通信速度のさらなる向上が必須となり、世界的レベルで5Gの実現が待たれるようになった。

日本では2020年3月から5Gのサービスが開始された。ところがCOVID-19(新型コロナウイルス感染症)の蔓延で出足は躓いてしまった。反面、ソーシャルディスタンスやリモートワーク、オンライン会議などが急速に広まり、インターネットトラフィックが急増した(図1)。さらに良い品質の通信システムの必要性や現状の通信規格では不十分であることが再認識され、5Gが次第に広まりつつある。これらの通信システムの変化はほぼ10年ごとに起きている(図2)。

第3節 テラヘルツ波工学の誕生と新産業創製

大阪大学 斗内 政吉

はじめに

Beyond 5G/6Gへの期待から、にわかにテラヘルツ電磁波が注目され始めた。テラヘルツ波は、概ね周波数100 GHz～30 THz (THzは 10^{12} Hz, 波長は3～0.01 mmに相当)の電磁波を意味する。5Gは、4.5 GHzおよび28 GHz帯の利用がキャリア・ローカル無線の両方で実用化され、特にローカル5Gでは、農場や工場などの特定の領域での高速・大容量無線の様々な新しい利用が期待されている。Beyond 5G/6Gの利用帯はまだ決まっていないが、300 GHz程度を想定して、研究開発が進められている。このことにより、本書のテーマである高周波対応基板材料の開発と評価の重要性が増している。また、テラヘルツ無線応用のみならず、テラヘルツ電磁波は様々な分野での新産業展開が期待されており、それらにおいても高周波材料のマーケット展開も期待される。本節では、筆者が取り組んできたテラヘルツ波工学の創成と新産業創製についての概論をまとめた。

1. テラヘルツ波工学の誕生

テラヘルツ電磁波は、古くより、電波天文や物質科学など特殊な学術的研究の場となってきた。1984年に極短光パルスを用いた電磁波の発生検出法が誕生し、研究者が物性評価に利用し始めたことで新しいテラヘルツ波工学分野の創成が始まった¹⁾。2000年以降には、テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS)²⁾が物性分析手法・イメージングツールとして確立され、プロトタイプ分光装置の市販化により、分析技術として確立してきた。それと呼応するように、フォトニクス技術や電子デバイス開発によるテラヘルツ波光源の開発も広がっている。そのような中、我が国は2004年にテラヘルツテクノロジー動向調査委員会による調査を実施し、世界で初めてテラヘルツ波産業分野の開拓ビジョンを取りまとめた³⁾。そこではテラヘルツ分野を、テラヘルツセンシング/テラヘルツエレクトロニクス/テラヘルツフォトニクス技術分野を統合した大きなプラットフォームとして再定義し、様々な応用シーンを提示した。現在でも、世界はそのビジョン⁴⁾に従い研究開発が進められ、年々、論文数が増大している。図1に近年のテラヘルツ関連の学術論文数の推移を示した。これは、文献データベースのScopus[®]で“Terahertz”または“THz”で検索したものである。テラヘルツ研究は順調に発展しており、世