

## ● 背景

- 近年、インターネットの利用増加、情報端末機器の高性能化・高機能化に伴い、伝送情報量の大容量化、データ処理の高速化が進む。
- 一度に伝送できる情報は電波の周波数が高いほど増加するため、取り扱われる信号は高周波化し、**第5世代移動通信システム(5G)**では3GHz~100GHzの高周波数帯が利用される。
- これまで低周波帯で用いられた材料では信号の**伝送損失**や**伝播遅延**が大きくなるため、高周波化に対応した材料の開発が求められている。

## 周波数による電波の分類と応用例

電波の名称	周波数帯	応用例
超短波(VHF)	30MHz~	F M放送・簡易無線・コードレス電話
極超短波(UHF)	300MHz~	携帯電話・無線LAN・TV放送
マイクロ波(SHF)	3GHz~	マイクロ波中継・放送番組中継・衛星放送
ミリ波(EHF)	30GHz~	電波天文・衛星通信・レーダー

小  
↓  
伝送可能な情報量  
大

## ● 電波信号の周波数と伝送速度の関係

電波信号は電場(電界)と磁場(磁界)の振動が空間を伝わる電磁波の1種であり、位置と時間で電界と磁界の強さが変化している。真空中における電磁波の伝送速度は光速に等しいが、媒体中では分極の影響で遅くなる。絶縁体上の導体回路を流れる電波信号は導体の電気抵抗や界面粗さによる導体損失、絶縁体の誘電分極の影響(誘電体損失)を受けて減衰する(伝送損失)。

- 伝送損失( $\alpha$ )  $\approx$  導体損失( $\alpha_c$ ) + 誘電体損失( $\alpha_d$ )
- 誘電体損失( $\alpha_d$ ) =  $k_1 f \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta$  /  $c$
- 伝播速度( $u$ ) =  $(K_2 \cdot c) / \sqrt{\epsilon_r}$

$\epsilon_r$ : 誘電率,  $\tan \delta$ : 誘電正接,  $f$ : 周波数,  $c$ : 真空中の光速,  $K_1, K_2$ : 比例定数

誘電体損失( $\alpha_d$ )を小さくするには… 誘電体の誘電率と誘電正接を低くする。特に、誘電正接 $\tan \delta$ の低減は有効。  
導体損失( $\alpha_c$ )を小さくするには… 導体表皮を平滑化して抵抗を低くする。  
伝播速度( $u$ )を小さくするには… 誘電率を小さくする。

## ● 伝送損失の低減方法

方法	手段	具体策
低誘電率化	モル分極率 $\phi$ を小さく	モル分極率の小さな原子を導入(F等), 極性構造(OH基等)の低減
	モル容積率 $v$ を大きく	高高い構造、整列し難い構造の導入(芳香環、脂環構造など)
低誘電正接化	双極子を小さく	無極性に近い構造とする
	双極子を固定	液晶配向や結晶配向により双極子を固定

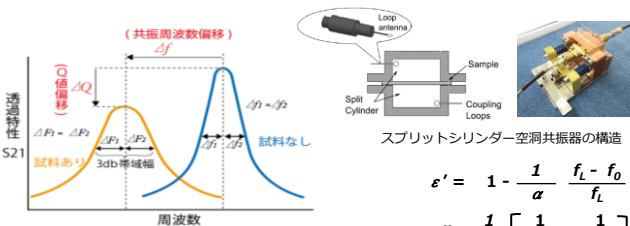
- 低誘電率化の手法として…
  - $\phi/v$ が高い原子団の導入を減らす(OH基、ウレタン基、アミド基、イミド基、エステル基、カルボニル基等)
  - モル分極率の小さい原子の導入(フッ素)  $\Rightarrow$  PTFE
  - 高高い脂環構造の導入  $\Rightarrow$  フルオレン構造、COP
- 低誘電正接化の手法として…
  - 双極子を小さく(無極性に近い構造)する  $\Rightarrow$  スチレン、ジビニルベンゼン、ノルボルネン等)  $\Rightarrow$  SPS、COP
  - 双極子を固定する  $\Rightarrow$  LCP、PEEK、PPS、ビスマレイミド系樹脂

## ● 誘電率・誘電正接の測定方法

- 容量法… 最大1GHzまで
- 伝送法… 高周波まで測定可、 $\tan \delta$ が10<sup>-2</sup>以上が対象
- 共振法… 高周波まで測定可、低損失材料が対象( $\tan \delta$ が10<sup>-2</sup>以下)

### ● 空洞共振器法

共振法は励振線を通じて共振器に電磁波を入射し、共振器内に特定の電磁界モードを励振させ、2つの励振線の間の透過量S<sub>21</sub>の測定から、共振周波数とQ値を求める方法。様々な形状のものが開発されているが、試料の加工のし易さから、**空洞共振器法(摂動法、スプリットシリンダー法)**が多く利用されている。



$$\epsilon' = 1 - \frac{1}{\alpha} \frac{f_L - f_0}{f_L} \frac{V}{\Delta V}$$

$$\epsilon'' = \frac{1}{2\alpha} \left[ \frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0} \right] \frac{V}{\Delta V}$$

$\epsilon'$ : 誘電率,  $\epsilon''$ : 誘電損失率,  $V, \Delta V$ : それぞれ共振器および試料の体積,  $f_L, f_0$ : " 空の共振器および試料を挿入した共振器の共振周波数,  $Q_0, Q_L$ : " 空の共振器および試料を挿入した共振器のQ値,  $\alpha$ : モード定数(共振器の形状と測定モードで決まる),  $Q$ 値(Quality Factor)…共振の鋭さを示す

空洞共振器法	摂動法	スプリットシリンダー法
電磁界モード	TM010/TM020	TM011
Q値	6,000~10,000	14,000以上
測定方向	試料長手方向	試料内方向
測定周波数の領域	1 ~ 10 GHz	10~80 GHz
試料形状(mm)	L80以上×w1.5以下 ×t1.5以下	(30~35)×(40~45) ×t0.3以下(0.1推奨)

## ● 誘電特性について

- 誘電率… 絶縁体の電気の留まりやすさ、分極のしやすさの指標  
留まった電気の影響を受けて、その絶縁体に挟まれた導電部分の電気の流れが阻害される。有機材料の誘電率は、Clausius-Mossottiの式(下式)で示され、**モル分極率/モル体積**が支配因子となる。

$$\epsilon = [1 + 2(\Sigma \phi / \Sigma v)] / [1 - (\Sigma \phi / \Sigma v)]$$

$\epsilon$ : 誘電率,  $\phi$ : モル分極率,  $v$ : モル体積

- 誘電正接… 熱エネルギーとなって損失する大きさ

絶縁材料に交流電圧を印加した際の分子の振動性の指標で、極性基などを持つ絶縁材料は電場変化に追従して電気エネルギーが熱エネルギーに変換されてしまい、電気エネルギーにロスが発生する。

## ● 低誘電材料の用途

用途	形態	期待される材料
FPC 基材	ドライフィルム	MPI, LCP, PPS, SPS, COP, 熱硬化PPE系
FPC カーボンレイ	同上	
FPC 接着層(基材-銅箔)	ワニス, 接着フィルム	可溶性ポリイミド、エポキシ系、BMI系、シアネート樹脂系、熱硬化PPE・スチレン系
多層基板の内層材	同上	

## ● 上市されているFPC基材用の低誘電基板材料

メーカー	製品名	主要材料	備考
村田製作所	メトロサーク	LCP	材料から一貫生産、スマホで先行(旧ゴアテックス)
クラレ	ベクスター	LCP	2020年までに生産規模3倍へ
千代田インテグ	ベリキュール	LCP	回路基板用
住友化学	スミカスーパー	可溶性LCP	樹脂ベースで販売
AZOTEK(台湾)	LCP	LCP	キャスト法採用
パナソニック	R-5515	熱硬化性樹脂	アンテナ用超低伝送損失の多層基板材料
日鉄ケミカル&マテリアル	エスバネックF	PI	無接着剤 低誘電PIの2層CCL
ロジャース	CuClad	フッ素樹脂	基地局、ミリ波レーダー向けで実績

## ● 開発動向

### ● フィルム材料(FPC基材)

エンブラ系フィルム(LCP, SPS, COP, PTFE)は良好な誘電特性を有するが、金属との接着性、加工性、コスト等に課題がある。現在はLCP軸で開発が進められているが、基地局やミリ波レーダー用途では、更に低損失の材料が求められる。多孔PIやPPE系熱硬化性樹脂なども検討されている。ディスプレイや車載アンテナなど透明性が求められる分野では透明PI、SPS、COP等を軸に開発が進む。

### ● ワニス材料(多層基板の内層材、FPC接着層)

BMI系、変性ポリイミド、熱硬化PPE・スチレン系材料など、溶剤可溶性樹脂の開発が活発化している。塗布型接着剤、多層基板コア材用プリプレグ、ビルドアップ用樹脂付き銅箔での展開が期待される。

## DJKは高分子材料に関する試験・研究を受託します

- 熱硬化性樹脂およびエンブラ(PI、LCP、PAEK、PES等)の合成および評価
- 溶融押出シート・キャスト膜の試作および評価
- プリプレグ・銅張積層板・FPCの試作および評価
- 各種物性評価… 誘電特性(Dk, Df/~24GHz)、熱特性(ガラス転移温度Tg, 熱分解温度Td, 線膨張係数CTE)、はんだ耐熱性、耐湿熱性、銅箔密着性(引き剥がし強さ)、機械物性(弾性率、引張強伸度、耐折り曲げ性)

ご質問等は [info@djklab.com](mailto:info@djklab.com) までお問い合わせください。