

# フリースペース法による高速通信用基板材料の複素誘電率測定

## 大日方快至

Measurement of Complex Permittivity of Substrate for High-speed Communication Equipment

by Free Space Method

Kaiji OBINATA

### 1. はじめに

近年、AI やクラウドサービスなどで扱うデータ量が飛躍的に増えており、今後データセンターで扱う通信速度に 400Gbps が検討されている。400Gbps を実現しようとする、最低でも 28GHz のベースクロックが必要になる。三次高調波まで流すことを考えると、ハードウェアに求められる通信性能は 100GHz まで必要となる。

一般的な電子機器の基板材料として、ガラスエポキシ基板（FR-4）が用いられる。大容量データを高速処理するために、基板内を伝搬する信号周波数は GHz 帯が用いられている。GHz 帯では、銅箔の表皮効果による導体損と、誘電基板材料の誘電損失により、信号の減衰が大きくなる。これまで、FR-4 の誘電損失に着目し、低損失材料の誘電率が測定できる平衡形円板共振器法（Balanced Disk Circular Resonator : BCDR）により、複素誘電率を測定してきた[1]。しかし、誘電損失から導出される導電率は周波数に比例し、60GHz 以上では損失が大きくなるため、BCDR では測定できなかった。

本研究では、高損失材料の複素誘電率が測定できるフリースペース法を用いて、100GHz までの測定法について検討する。FR-4 基板と、低損失基板として GHz 帯で用いられる MEGTRON6 と 7 (Panasonic) の複素誘電率を測定した。

### 2. フリースペース法による複素誘電率測定法

誘電材料の複素誘電率は式(1)の通り表すことができる。

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r \quad (1)$$

実部は比誘電率、虚部は誘電損失である。基板の損失は誘電正接  $\tan\delta$  で測定することができる。

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''_r}{\varepsilon'_r} \quad (2)$$

比誘電率  $\varepsilon'_r$  と誘電正接  $\tan\delta$  から誘電損失  $\varepsilon''_r$  を求めることができる。誘電損失は、式(3)により導電率に変換できる。

$$\sigma = \omega\varepsilon''_r\varepsilon_0 \quad (3)$$

基板の導電率は周波数に比例するため、周波数が高くなるほど信号が減衰する。

誘電率測定法としては、高損失材料が測定可能な反射伝送法と、低損失材料が測定可能な共振器法がある。これま

で測定してきた BCDR は共振器法であり、導電率が小さい低周波側で、測定精度が得られた。しかし、60GHz 以上で損失が大きくなり、測定精度が劣化した。そのため、反射伝送法であるフリースペース法により測定を行う。

図 1 にフリースペース法の測定系 (EM ラボ, FS-330) を示す。ベクトル・ネットワーク・アナライザ (VNA : Keysight N5222b+N5292A) から Port 1 の誘電体レンズ付きアンテナに信号を印加して、ミリ波帯電波を試料に照射する。試料からの反射波または透過波から S パラメータを測定する。ホーンアンテナに取り付ける導波管には、26.5GHz～90GHz 帯の周波数帯毎に R, U, E バンドの 3 つがあり、これらを付け替えることで広帯域での測定を実現した。ホーンアンテナから照射されたミリ波電波は、試料面に対して垂直方向に照射されるため、測定される誘電率は電界の方向と同じ試料面に対して水平方向となる。誘電率は、測定した S パラメータから、材料測定スイート (Keysight N1500) 内の NIST Precision モデルを用いて誘電率を算出する。

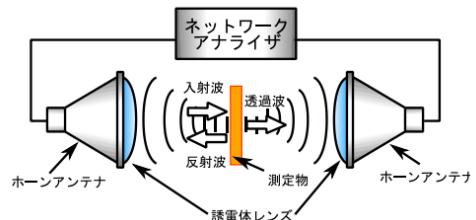
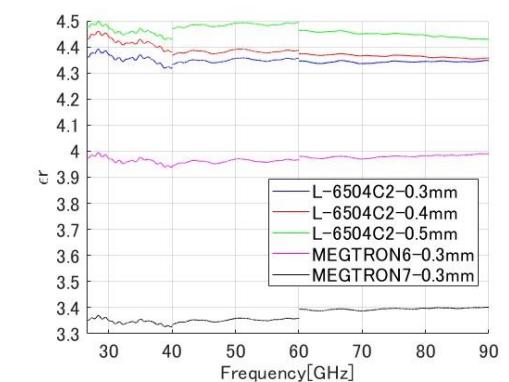


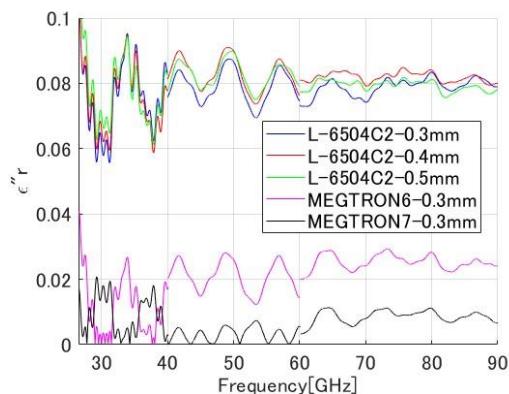
図 1 フリースペース法の測定系

表 1 研究に用いた基板材料

基板名	メーカー名	公称厚
L-6504C2	東芝ケミカル	0.3mm
		0.4mm
		0.5mm
R-5775	パナソニック	0.3mm
R-5785	パナソニック	0.3mm



(a) 比誘電率  $\epsilon_r'$



(b) 誘電損失  $\epsilon_r''$

図 2 フリースペース法による基板の複素誘電率

本研究で用いたプリント基板材を表 1 に示す。FR-4 基板（東芝, L-6504C2）と、20GHz 以上で低損失材として用いられる MEGTRON6 と 7 の誘電率を測定した。

また、測定精度の確認のため、標準校正用ポリカーボネート（公称厚:2mm）も測定した。

### 3. フリースペース法による水平方向の複素誘電率の測定結果

厚みが 0.3mm の FR-4 基板と低損失基板である MEGTRON6 と 7 の複素誘電率の測定結果を図 2(a)と(b)に示す。ポリカーボネートの測定結果は図 3 に示す。

FR-4 基板の比誘電率  $\epsilon_r'$  は厚さごとに大きな差は見られず、約 4.4 であった。一方、MEGTRON6 の比誘電率はそれよりも 0.4 ほど小さい約 4.0、MEGTRON7 はそこから 0.6 ほど小さい約 3.4 に近い値になった。60GHz 付近で特性に段差が現れるのは、U バンドと E バンドの境目で差が生じたためである。26.5~90GHz 帯において、比誘電率はほぼ一定となった。

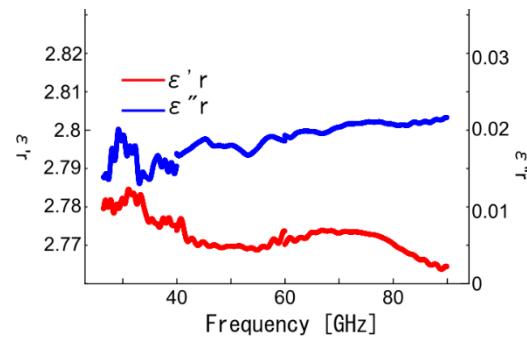


図 3 ポリカーボネートの複素誘電率

FR-4 基板の誘電損失も厚さごとに大きな差は見られず 0.08 ほどになった。MEGTRON6 はその約 1/4 の 0.02 付近の値になり、MEGTRON7 は FR-4 基板の約 1/8 の 0.01 近くの値になった。

40GHz 以下の R バンドで測定精度が落ちている。 $\epsilon_r''$  は 40GHz 以下のところではポリカーボネートでもノイズによるばらつきがみられたが、基板材料では ±0.02 くらいのばらつきがあるのに対して、ポリカーボネートでは ±0.002 ほどの範囲でしかばらつきがないのがわかる。

図 2(b)の FR-4 基板の測定結果をみると、一定の規則性をもち、周波数が上がるにつれて、振幅が小さくなっている波形のようになっていることがわかる。また、ほかの基板と見比べてみると同じような形を示していることがわかる。対して、ポリカーボネートの誘電損失は違う形の波形をしている、薄い試料を測るときにはこのような波形が出てきて資料が厚くなるにつれて、フラットになっていくと予想した。

フリースペース法は 60~90GHz の高周波での測定が安定している。60GHz 以下では BCDR の測定が可能であるため、フリースペース法と BCDR を組み合わせることにより、幅広い周波数での測定が可能である。

### 4. まとめ

ミリ波帯におけるプリント基板材の複素誘電率をフリースペース法により測定した。一般的な電子機器に用いられている FR-4 基板や、低損失である MEGTRON 基板で測定した結果、90GHz 帯まで複素誘電率が測定できた。

ポリカーボネートに比べて、プリント基板で測定のばらつきが大きくなったことは、今後検討が必要である。

### 参考文献

- [1]内藤さくら 他, “20GHz 超における BCDR とフリースペース法を用いたプリント基板の複素誘電率測定”, 信学技報, vol. 124, no. 210, EMCJ2024-41, pp. 28-33, (2024)