

# 平衡形円板共振器法を用いた 6~60GHz にわたる誘電体基板の複素誘電率測定

Measurements of Complex Permittivity of Dielectric Plates over the Ranges 6~60GHz  
Using a Balanced-type Circular Disk Resonator Method

金子 彰吾<sup>†</sup> 小林 祐夫<sup>††</sup> 馬 哲旺<sup>†</sup>

Shogo Kaneko Yoshiro Kobayashi Zhewang Ma

<sup>†</sup>埼玉大学 <sup>††</sup>サムテック(有)

Saitama University SUMTEC, INC.

## 1. はじめに

平衡形円板共振器法は誘電体基板の垂直方向の複素誘電率(比誘電率 $\epsilon_m$ , 誘電正接 $\tan\delta_m$ )の測定に用いられる<sup>[1]</sup>。最近、1個の共振器で共振周波数が異なる $TM_{0m0}$ モードを用いて広帯域に複素誘電率測定を行うことが可能になった<sup>[2]</sup>。本研究では、円板共振器の励振線を 3.5mm コネクタ(~26.5GHz)から 1.85mm(~65GHz)コネクタに付け替えることにより、マイクロ波からミリ波帯にわたる複素誘電率測定が実現されたので報告する。さらに、ごく最近 1.0mm コネクタ(~110GHz)を用いることにより、110GHz にわたる測定も可能となったのであわせて報告する。

## 2. 測定原理

同軸励振平衡形円板共振器の構造を図 1 に示す。この共振器は直径 $2R$  の円形銅箔を厚さ $t$  の 2 枚の基板で挟み、さらにそれを 2 枚の純銅平板で挟んで構成される。励振は円形銅箔の中心軸上に設けた直径 $2a$  の励振孔を介して同軸励振線により電界結合で行う。この励振構造では、円板中心部に電界が集中する $TM_{0m0}$  モードのみが励振される。

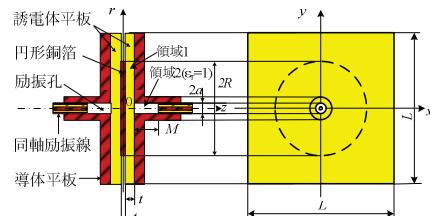


図 1 同軸励振平衡形円板共振器の構造

$\epsilon_m$  は $TM_{0m0}$  モードの共振周波数 $f_{0m0}$  の測定値から次式により求まる<sup>[1]</sup>。

$$\det H(\epsilon_m; f_{0m0}, R + \Delta R, a, M, t) = 0 \quad (1)$$

上式は $R + \Delta R$  に磁気壁を仮定し、リツツ・ガレルキン法を用いた解析により厳密に求められる<sup>[1]</sup>。また、 $\Delta R$  は端効果による半径の補正量であり次式により求まる<sup>[1]</sup>。

$$\Delta R = \left( \frac{x_{0m0}}{X_{0m0,\Delta R}(s)} - 1 \right) R \quad (2)$$

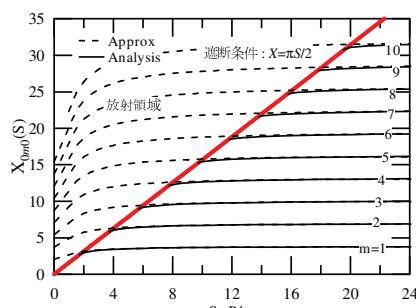


図 2  $TM_{0m0}$  モード固有値の計算結果

ただし、固有値 $X_{0m0, \Delta R}(s)$ の計算結果を図 2 に示す<sup>[1]</sup>。太線で示した $X=\pi S/2$  は遮断条件を示し、その左側は電磁界エネルギーが半径方向に放射する領域である。半径方向の遮断周波数 $f_c$ は次式より求まる。

$$f_c = \frac{c}{4t\sqrt{\epsilon_m}} \quad (3)$$

$\tan\delta_m$  は $TM_{0m0}$  モードの無負荷 $Q$ ,  $Q_u$  の測定値から次式より求まる<sup>[1]</sup>。

$$\tan\delta_m = \left( \frac{1}{Q_u} - \frac{R_s}{B} \right) (1+A) \quad (4)$$

ただし、A, B は数値解析により求められる定数である<sup>[1]</sup>。 $R_s$  は導体の表面抵抗、 $\sigma$  は導電率であり、次式より求まる<sup>[1]</sup>。

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega_0 \mu_0}{2\sigma}} \quad \sigma = \sigma_r \sigma_0 \quad (5)$$

ただし、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $\sigma$  は導電率、 $\sigma_r$  は比導電率、 $\sigma_0 (= 58 \times 10^6 \text{ S/m})$  は万国標準軟銅の導電率である。 $\sigma_r$  の値は 2 誘電体共振器法<sup>[3]</sup>により予め測定しておく必要がある。

## 3. 測定装置および測定条件

1.85 コネクタ同軸励振平衡形円板共振器の外観を図 3 に示す。 $t_c=25\mu\text{m}$ ,  $2R=30\text{mm}$  の円形銅箔を用いる。解析上、励振孔は $TM_{01}$  モード遮断円筒導波管を構成する必要があるので、その遮断周波数 $f_{cw}$  が測定できる最高周波数となる。すなはち、

$$f_{cw} = \frac{j_{01} c_0}{2\pi a} \quad (6)$$

ただし、 $j_{01}=2.4048$  である。この装置では $2a=2.20\text{mm}$  より $f_{cw}=104\text{GHz}$  であり上限測定周波数 65GHz を十分満足している。

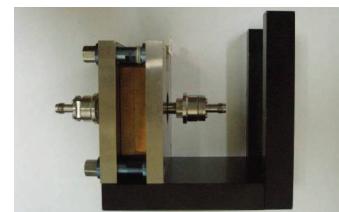


図 3 1.85 コネクタ同軸励振平衡形円板共振器の外観

また 110GHz にわたる測定を行うために新たに 1.0 コネクタを用いた $2a=1.19\text{mm}$ ( $f_{cw}=193\text{GHz}$ )の共振器を製作した。 $2R=30\text{mm}$  の円形銅箔では 60GHz 以上で不要モードが発生し、モード判別が困難となったので、この装置では $t_c=25\mu\text{m}$ ,  $2R=15\text{mm}$  の円形銅箔を用いた。

## 4. 測定結果

### 4.1 シクロオレフィンポリマー(COP)基板の測定結果

COP 基板(日本ゼオン社,  $t=0.378\text{mm}$ )のネットワークアナライザ上の周波数応答波形を図 4 に示す。図中に示した $TM_{0m0}$  モードを用いて測定した $\epsilon_m$ ,  $\tan\delta_m$  の結果を図 5 に示す。

す。 $2R=30\text{mm}$  および  $15\text{mm}$  の円形銅箔による結果をそれぞれ△印および×印で示す。このときの半径方向の遮断周波数は式(3)より  $129\text{GHz}$  である。比較のための空洞共振器法および遮断円筒導波管法<sup>[4]</sup>により求めた平面方向の複素誘電率( $\epsilon_{rt}$ ,  $\tan\delta_r$ )の測定結果を○印で示す。測定値は5回測定の平均値で、測定誤差は標準偏差である。比誘電率および誘電正接にはともに異方性が認められない。 $2R=30\text{mm}$  および  $15\text{mm}$  の円形銅箔による結果は誤差の範囲内で一致している。 $2R=15\text{mm}$  の場合  $\tan\delta_r$  のばらつき誤差が高次のモードになるにつれて大きくなっている。この原因は  $Q$  値のばらつきが大きくなつたためである。

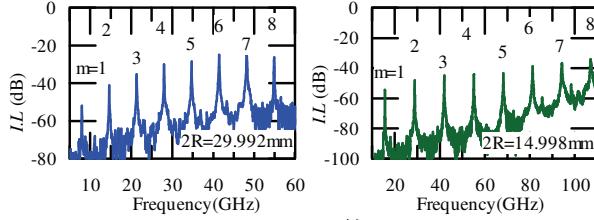
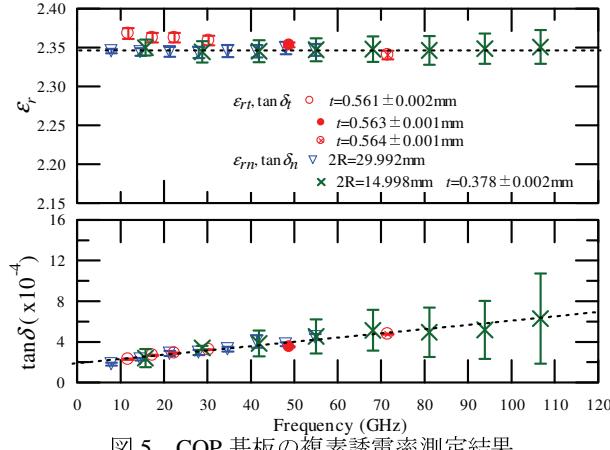
図4 COP基板の周波数応答波形(TM<sub>0m0</sub>モード)

図5 COP基板の複素誘電率測定結果

#### 4.2 ガラスクロス・PTFE(CGS)基板

CGS基板(中興化成社,  $t=0.376\text{mm}$ )の周波数応答波形を図6に、 $\epsilon_{rt}$ ,  $\tan\delta_r$ の測定結果を図7に示す。

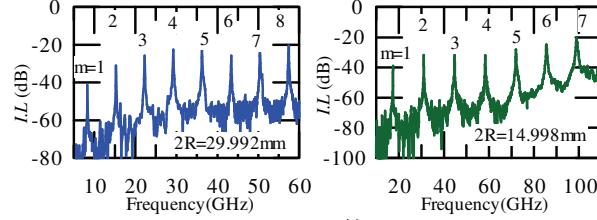
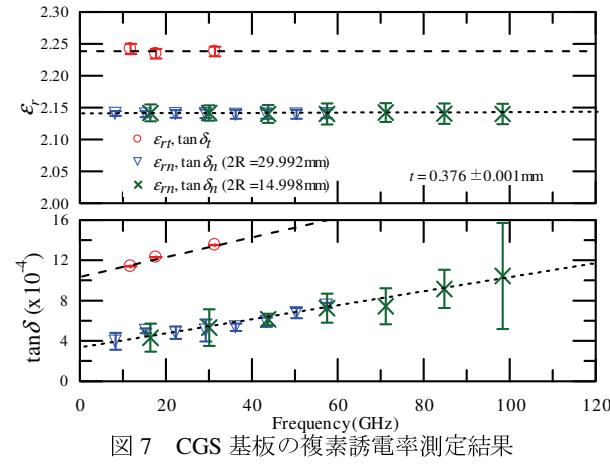
図6 CGS基板の周波数応答波形(TM<sub>0m0</sub>モード)

図7 CGS基板の複素誘電率測定結果

このときの半径方向の遮断周波数は  $136\text{GHz}$  である。比誘電率および誘電正接にはともに異方性が認められる。

#### 4.3 ガラスクロス・PTFE(CGA500)基板

CGA500基板(中興化成社,  $t=0.505\text{mm}$ )の周波数応答波形を図8に、 $\epsilon_{rn}$ ,  $\tan\delta_n$ の測定結果を図9に示す。 $2R=15\text{mm}$ において  $\text{TM}_{070}$  以降の  $\text{TM}_{0m0}$  モードは  $S=14.8$  であるため図2より半径方向に放射した。このときの  $f_c$  は  $86\text{GHz}$  である。比誘電率および誘電正接にはともに異方性が認められる。

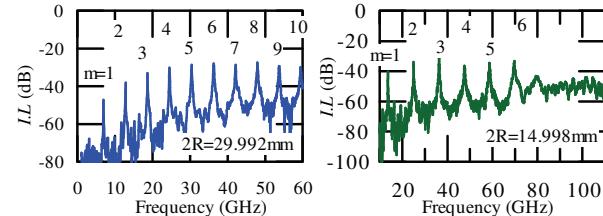
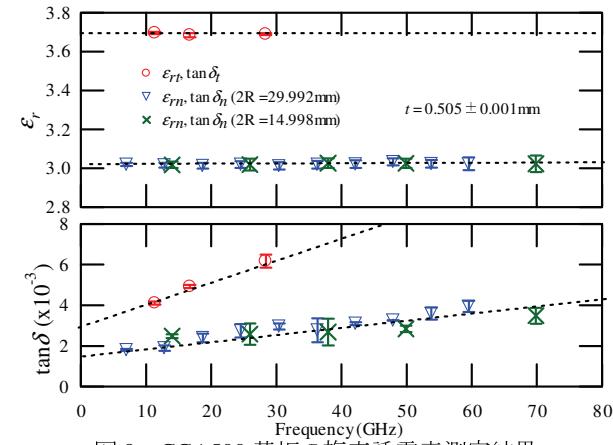
図8 CGA500基板の周波数応答波形(TM<sub>0m0</sub>モード)

図9 CGA500基板の複素誘電率測定結果

#### 5.まとめ

1.85mmコネクタを用いた平衡形円板共振器法により7~60GHzにわたる8オクターブ以上の複素誘電率の測定が可能となった。さらには、1.0mmコネクタにより110GHzにわたる測定が可能となった。最後に、共振器製作にご協力頂いた株式会社川島製作所に深謝致します。

#### 参考文献

- [1]H. Kawabata, K. Hasuike, Y. Kobayashi and Z. Ma, "Multi-frequency measurements of complex permittivity of dielectric plates using higher-order modes of a balanced-Type circular disk resonator", in Proc. 36th European Microwave Conf. pp. 388-391, Sep. 2006
- [2]和田山修平, 小林禎夫, 馬哲旺, “シクロオレフィンポリマー基板のマイクロ波・ミリ波特性測定”, 第24回エレクトロニクス実装学会講演大会論文集, pp. 130-131, Oct. 2010
- [3]Y. Kobayashi and M. Kato, "Microwave measurement of dielectric properties of low-loss materials by dielectric rod resonator method", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-33, No. 7, pp. 586-592, Jul. 1985.
- [4]小林禎夫, 清水隆志, “銅張誘電体積層基板のミリ波測定法と測定結果”, 平22電気学会電子・情報システム部門大会, TC16-3, Sep. 3, 2010

#### 連絡先

氏名: 小林 禎夫  
所属機関: サムテック(有)  
所在地: 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255  
埼玉大学地域オープンイノベーションセンター  
電話/ FAX: 048(856)1546 E-mail: kobayashi@sumtec.biz