

## 銅張り誘電体積層基板のマイクロ波評価技術

小林 禧夫<sup>†a)</sup>

Microwave Evaluation Techniques of Copper-Clad Dielectric Laminate Substrates

Yoshio KOBAYASHI<sup>†a)</sup>

あらまし 銅張り誘電体積層基板を用いてマイクロ波平面回路を設計する際に必要とされる材料定数のマイクロ波測定法を紹介する。この基板の平面方向の複素比誘電率は空洞共振器法(2~40 GHz)及び遮断円筒導波管法(30~100 GHz)により、また垂直方向の複素比誘電率は平衡形円板共振器法により測定される。また誘電体基板の両面に張られた銅はく表面の比導電率は2誘電体円柱共振器法により、また裏面の比導電率はMIC形誘電体円柱共振法により測定される。これらの測定結果はマイクロストリップ構造やコプレーナ構造の平面回路を実際に設計する際に有用である。

キーワード マイクロ波測定, 誘電率測定, 誘電体基板, 表面抵抗測定

## 1. まえがき

銅張り誘電体積層基板は、マイクロ波平面回路 [1] 用基板として広く利用されている。例えば、銅張りふっ素樹脂ガラスクロス積層基板の構造は、図1に示すように、PTFE ( $\epsilon_r = 2.05$ ) 樹脂を含浸させたガラス ( $\epsilon_r = 6.3$ ) クロスを適当な厚さに積層して、その両面を電界銅はくではさみ、熱圧着により硬化させたものである。したがって、その比誘電率は基板の平面方向 ( $\epsilon_t$ ) と垂直方向 ( $\epsilon_n$ ) で異なり、異方性をもつ。また樹脂含有率に応じて比誘電率は 2.05 と 6.3 の間の値をとり、樹脂含有率が

低いほど、比誘電率は高くなり、機械的強度は増す。更に、ガラスクロスと接する銅はく裏面は接着強度を強めるために厚さ  $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$  面荒らしされている。マイクロ波帯では、表皮効果のため電流は厚さ  $1 \mu\text{m}$  以下の導体表面にしか流れないため、実効的な銅はく裏面の比導電率  $\sigma_{rb}$  は、表面の比導電率  $\sigma_{rf}$  よりも低くなる。一般に、マイクロ波帯における導体の比導電率  $\sigma_r$  は、導体の表面抵抗  $R_s$  の測定値を用いて次式より求められる。

$$\sigma_r = \frac{\pi f \mu}{\sigma_0 R_s^2} \quad (1)$$

ただし、 $\sigma_0 = 58 \times 10^6$  (S/m) は万国標準軟銅の導電率である。

コプレーナ線路構造の平面回路設計の際には、 $\epsilon_t$ 、 $\sigma_{rf}$  及び  $\sigma_{rb}$  の値が主要であり、マイクロストリップ構造の平面回路設計には、 $\epsilon_n$  と  $\sigma_{rb}$  値が主要である。マイクロ波帯におけるこれらの材料定数は、種々の共振器法を駆使して行われてきた [2] ~ [19]。その温度依存性自動測定システムの構成例を図2に示す。ネットワークアナライザ上に  $S_{21}$  の周波数特性を図示し、共振器の共振ピーク波形から共振周波数と無負荷  $Q$  値を測定し、厳密な電磁界解析に基づいた数値計算によりこれらの材料定数を求める。

本論文では、この種の基板に関する  $\epsilon_t$ 、 $\tan \delta_t$ 、 $\epsilon_n$ 、 $\tan \delta_n$ 、 $\sigma_{rf}$  及び  $\sigma_{rb}$  のマイクロ波測定について、これまで発表されてきた方法をまとめ、更に最近の発展について述べる。

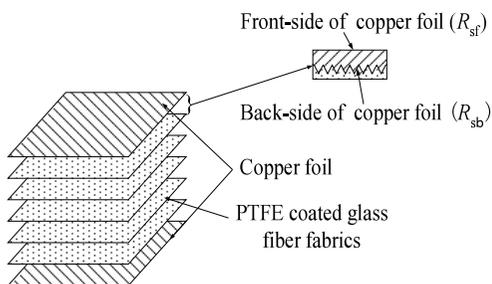


図1 銅張りふっ素樹脂ガラスクロス積層基板の構造  
Fig.1 Structure of copper-clad PTFE glass cross laminate substrate.

<sup>†</sup> 埼玉大学工学部, さいたま市

Saitama University, Saitama-shi, 338-8570 Japan

a) E-mail: yoshio@reso.ees.saitama-u.ac.jp

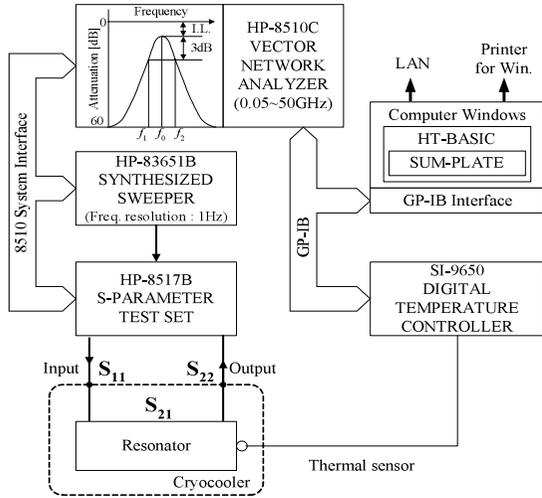


図 2 自動測定システムのブロック図

Fig. 2 Block diagram of an automatic measurement system.

## 2. 平面方向の複素比誘電率測定法

### 2.1 空洞共振器法 (2 ~ 40 GHz)

この方法は、マイクロ波帯における誘電体基板の面方向の複素比誘電率 ( $\epsilon_t, \tan \delta_t$ ) を測定するために開発され [2], [3], JIS R 1641 (2002) として制定された。図 3 にその構造図を示す。この構造は、直径  $D$ 、長さ  $H$  の導体円筒空洞を二つに分割し、その間に厚さ  $t$  の誘電体基板を挟んで共振器を構成する。このため、測定試料の着脱が容易であり、非破壊測定に有効である。この共振器の励振及び検波には、先端に微小ループをもつ同軸励振線を用いて軸方向より行う。なお、共振器の  $D, H, \sigma_r$  は、図 3 (a) の構造を用いて  $TE_{011}$  モードと  $TE_{012}$  モードの共振周波数  $f_{01}, f_{02}$  及び、無負荷  $Q, Q_u$  の測定値より求められる。また、比誘電率  $\epsilon_t$  は、図 3 (b) の構造を用いて  $TE_{011}$  モードの共振周波数  $f_0$  の測定値より、また  $\tan \delta_t$  は無負荷  $Q, Q_u$  の測定値より、縁端効果考慮した厳密解析に基づいた数値計算により、正確な値が求められる。また、温度依存性の自動測定プログラム及びシステムを開発し、高精度かつ高能率測定を実現した [4]。

図 2 の自動測定システムを用いて、空洞共振器法によるふっ素樹脂ガラスクロス積層基板の複素比誘電率の測定を行った。その結果を図 4 に示す。ふっ素樹脂の相転移のため、23°C 付近で複素比誘電率の急変が生じている。

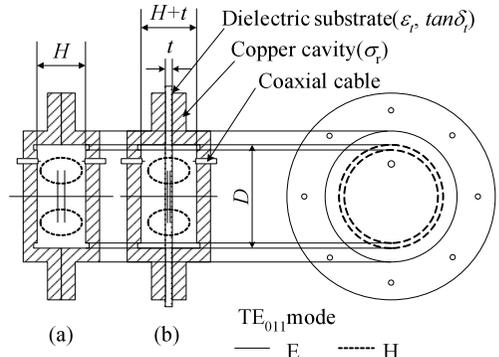
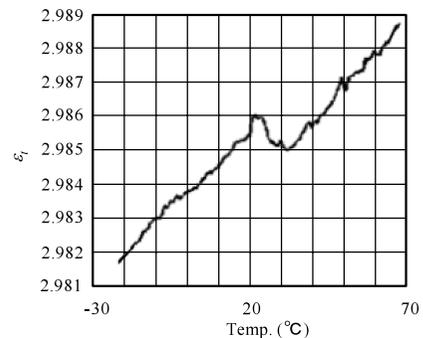
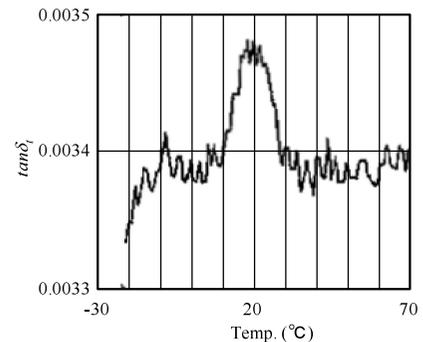


図 3 空洞共振器法 (2 ~ 40 GHz)  
Fig. 3 Cavity resonator method (2-40 GHz).



(a)  $\epsilon_t$



(b)  $\tan \delta_t$

図 4 空洞共振器によるふっ素樹脂ガラスクロス積層基板の温度特性の測定結果 [12]

Fig. 4 Measured results of temperature dependence of PTFE glass cross laminate substrate using cavity resonator [12].

### 2.2 遮断円筒導波管法 (30 ~ 100 GHz)

この方法は、円筒空洞共振器の製作がミリ波帯で困難になるために開発された測定法である [5] ~ [7]。JIS R 1660-1 (2004) 及び IEC 61338-1-4 (2005) として制定された。図 5 にその構造を示す。誘電体平板

は二つに分割した導体円筒の間に挟まれる．導体円筒部分は  $TE_{01}$  モード遮断円筒導波管を構成し，電磁界は試料から離れるに従って急激に減少する．また，導波管モードなどの不要モードの影響を抑制するために，円筒空洞の両端に電波吸収体を配置する．共振器の励振及び検波は直径 1.2 mm の先端ループ同軸励振線を用いて，半径方向より磁界結合で行う． $\epsilon_t$  は  $TE_{0m1}$  モードの  $f_0$  の測定値より， $\tan \delta_t$  は  $Q_u$  の測定値より，試料挿入部の縁端効果を考慮に入れた正確な値が求められる．

この方法で 50 GHz 帯において測定されたポリオレフィン系樹脂基板と樹脂ガラスクロス積層基板の測定結

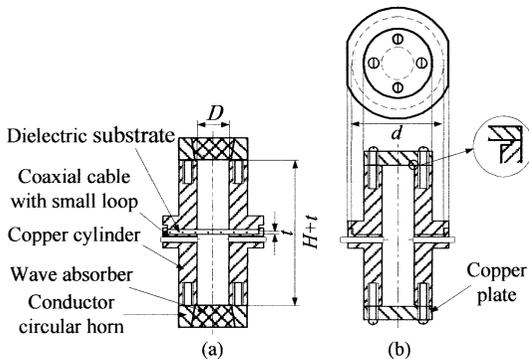


図 5 遮断円筒導波管法 (30 ~ 100 GHz)  
Fig. 5 Cut-off circular waveguide method (30 ~ 100 GHz).

表 1 樹脂基板の測定結果  
Table 1 Measured results of resin substrates.

試料名	$t$ (mm)	$f_0$ (GHz)	$Q_u$	$\epsilon_t$	$\tan \delta_t$ ( $\times 10^{-3}$ )
ポリオレフィン系 基板	0.509 $\pm 0.001$	49.526 $\pm 0.001$	4190 $\pm 40$	2.320 $\pm 0.005$	0.453 $\pm 0.007$
樹脂ガラスクロス積層 基板	0.696 $\pm 0.001$	40.556 $\pm 0.2$	160 $\pm 5$	4.009 $\pm 0.20$	8.78 $\pm 0.22$

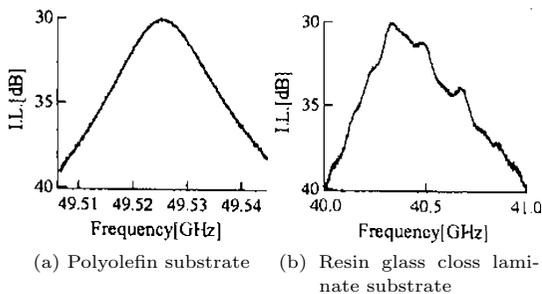


図 6 ミリ波帯における  $TE_{011}$  モード共振波形  
Fig. 6 Resonance curves of  $TE_{011}$  mode in the millimeter waves.

果を表 1 に示す．この測定法は低損失 ( $\tan \delta < 10^{-3}$ ) 材料に対して有効数字 4 けたの精度が得られる．また，それぞれの  $TE_{011}$  モードの共振波形を図 6 に示す．均質構造のポリオレフィン系基板に対するきれいなベル状共振波形に比べて，樹脂ガラスクロス積層基板の共振波形がうねっているのは，ガラスクロスの繊維間隔の影響が現れているからであり，この積層基板のミリ波帯における適用限界を示している．

### 3. 垂直方向の複素比誘電率の測定

図 7 に示す平衡形円板共振器法は，誘電体基板の垂直方向の複素比誘電率を測定するために開発された．平衡構造により半径方向への放射が抑制される．また，円板の製作が正円からずれても，モード分離を起こさない  $TM_{010}$  モードを用いる．励振方法により 2 種類に分ける．ストリップ線路により導体円板の側面から励振する場合を S-励振と呼ぶ．また，円板の中心部に電界成分をもつ  $TM_{0m0}$  モードのみを選択的に励振させるために円板の中心で同軸線により励振を行う場合を C-励振と呼ぶ．

#### 3.1 S-励振平衡形円板共振器

S-励振平衡形円板共振器の構造を図 7 に示す．2 枚の両面銅はく付誘電体基板（誘電体厚さ  $t$ ，銅はくはく厚さ  $d$ ）を用いる場合，上部誘電体基板の下面の銅はくを除去し，下部誘電体基板の上面には，直径  $D$  の円板と  $50 \Omega$  線路の幅  $w$  をもつ入出力励振線をエッチング技術により構成する． $\epsilon_n$  は  $TM_{010}$  モードの共振周波数  $f_0$  の測定値から，また， $\tan \delta_n$  は  $TM_{010}$  モードの無負荷  $Q$ ， $Q_u$  の測定値から，円板周辺部の

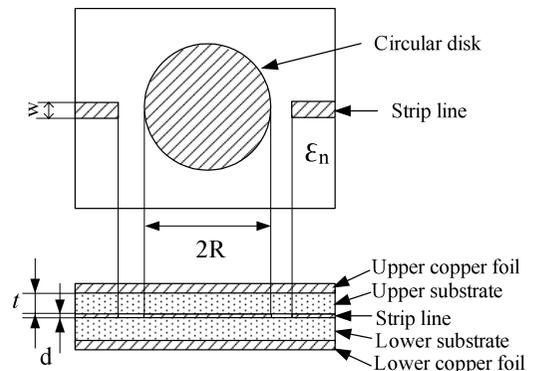
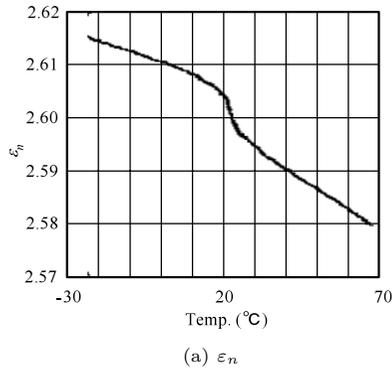
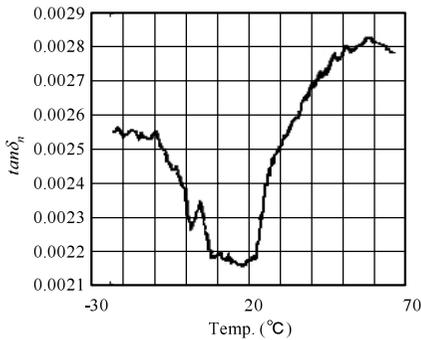


図 7 平衡形円板共振器の構造 (S-励振)  
Fig. 7 Balanced type circular disk resonator (S-type excitation).



(a)  $\epsilon_n$



(b)  $\tan \delta_n$

図 8 平衡形円板共振器によるふっ素樹脂ガラスクロス積層基板の温度特性の測定結果 [12]

Fig. 8 Measured results of temperature dependence of PTFE glass cross laminate substrate using balanced type circular disk resonator [12].

縁端効果を考慮した厳密な解析結果に基づく数値計算により正確に求められる [8] ~ [10] .

本法によるふっ素樹脂ガラスクロス積層基板の測定結果を図 8 に示す . 空洞共振器法による測定結果図 4 と比較すると , 複素比誘電率に異方性があることが分かる .

この励振法では , 誘電体基板が薄い場合  $50 \Omega$  線路幅が細くなるためコネクタと整合をとることが困難になり , また , すべての共振モードが励振されるため損失の多い場合隣接モードとの判断が困難となる [11] .

### 3.2 C-励振平衡形円板共振器

この構造を図 9 に示す . 共振器は , 直径  $D = (2R)$  の導体円板を 2 枚の誘電体基板 (厚さ  $t$  , 比誘電率  $\epsilon_n$  , 誘電正接  $\tan \delta_n$ ) 及び導体板で挟んで構成される . この共振器は , 導体円板の中心軸に沿って平行導体板に設けられた直径  $2a$  の孔から同軸励振線により電界結合される . この孔は  $TM_{0m}$  モード遮断円形導波管を構成するので , 結合度は空げき長  $M$  によって調節さ

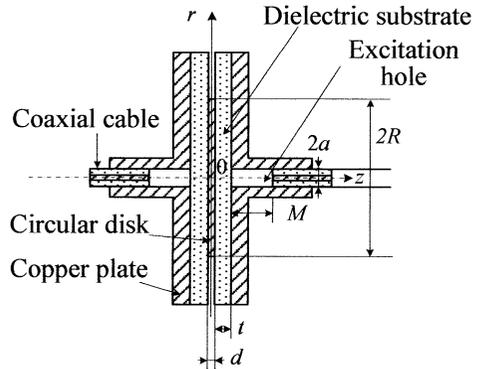


図 9 平衡形円板共振器の構造 (C-励振)  
Fig. 9 Balanced type circular disk resonator (C-type excitation).

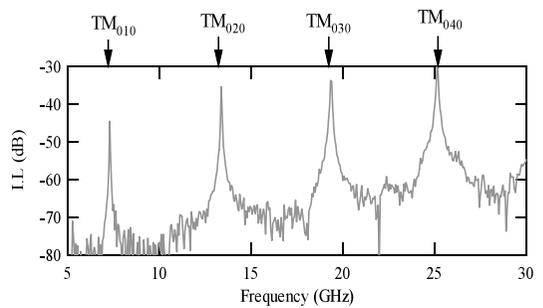


図 10 周波数応答波形 (C-励振)  
Fig. 10 Frequency response (C-type excitation).

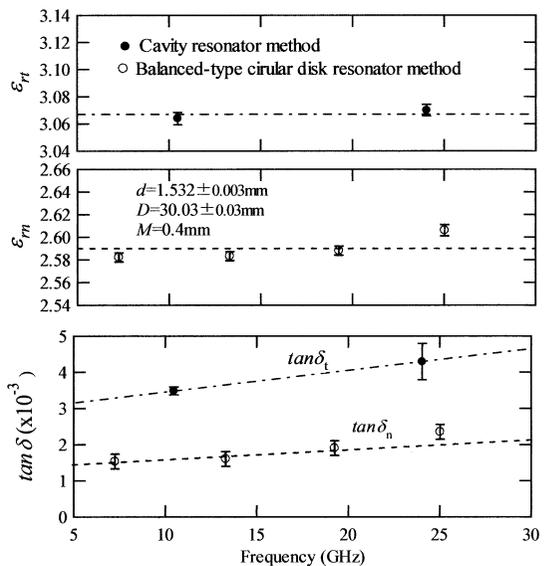


図 11 ふっ素樹脂ガラスクロス積層基板の測定結果  
Fig. 11 Measured results of PTFE glass cross laminate substrate.

れる。  $\epsilon_n, \tan \delta_n$  は、円板周辺部の縁端効果及び励振孔を考慮した厳密な解析結果に基づき、数値計算により正確に求められる。なお、導体円板の厚さ  $d$  は無視している [14]。また、この方法では薄い基板及び損失が大きい基板の測定も可能となる [11]。

更に、本法は  $TM_{0m0}$  モードのみ選択的に励振されるため複素比誘電率の周波数依存性を簡単に測定できる。一例として、 $t = 1.532 \text{ mm}$  のふっ素樹脂ガラスクロス積層基板を用いた場合の周波数応答波形を図 10 に示す。図中上部には、各モードについて励振孔及び縁端効果を無視して計算した共振周波数を示す。これより、予想どおり、他の  $TM_{nm0}$  ( $n \neq 0$ ) モードは励振されていない。更に、図 11 に  $\epsilon_t, \epsilon_n$  と  $\tan \delta_t, \tan \delta_n$  の測定結果を示す。空洞共振器法により、 $\epsilon_t = 3.06$  となった。本法により、 $\epsilon_n = 2.59$  となった。ふっ素樹脂ガラスクロス積層基板の平面方向と垂直方向の複素比誘電率の異方性が確認できた [15]。

#### 4. 銅はくの比導電率の測定

##### 4.1 銅はく表面の比導電率 $\sigma_{rf}$ の測定

銅はく表面(空気と接する面)の  $R_{sf}, \sigma_{rf}$  を測定するために 2 誘電体円柱共振器法が開発され [16], JIS R 1627 (1996) 及び IEC 61338-1-3 (1999) として制定されている。図 12 にその構造を示す。同一材料より製作される直径  $D$  が等しく、長さ  $L$  が 3 倍異なる 2 個の誘電体円柱をそれぞれ 2 枚の片面銅張誘電体基板で挟み、同一の共振周波数  $f_0$  をもつ  $TE_{011}, TE_{013}$

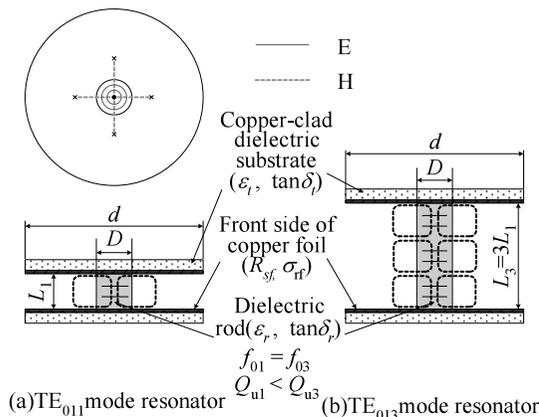


図 12 誘電体円柱共振器の構造と  $TE_{01p}$  モードの電磁界分布

Fig. 12 Structure of dielectric resonator and fields plots of  $TE_{01p}$  mode.

モードで共振する 2 個の共振器を構成する。これをそれぞれ  $TE_{011}$  共振器、 $TE_{013}$  共振器と呼ぶ。共振器の  $f_0$  と無負荷  $Q, Q_u$  の測定値より誘電体円柱  $\epsilon_r, \tan \delta_r$  及び銅はく表面の  $\sigma_{rf}$  が求められる。

##### 4.2 銅はく裏面の比導電率 $\sigma_{rb}$ の測定

銅はく裏面(誘電体基板と接する面)の  $\sigma_{rb}$  を測定するために、2 枚の基板が必要な誘電体円柱共振器法 [17] と 1 枚の基板で済む MIC 形誘電体円柱共振器法が開発されている [18]。ここでは、後者の共振器法について述べる [18]~[20]。その共振器は、銅板 ( $R_s, \sigma_r$ ) と銅張積層基板(基板厚さ  $t, \epsilon_t, \tan \delta_t$ ) の間に  $(Zr, Sn)TiO_4$  誘電体円柱(比誘電率  $\epsilon_r$ , 誘電正接  $\tan \delta_r$ ) を、図 13 に示すように配置して構成される。この共振器の  $TE_{01\delta}$  モードの共振周波数  $f_0$  と無負荷  $Q, Q_u$  の測定値より、銅はく裏面の  $\sigma_{rb}$  が求められる。本測定法では、あらかじめ 2 誘電体円柱共振器法により  $\epsilon_r, \tan \delta_r$  及び  $R_s, \sigma_r$  を、また空洞共振器法により  $\epsilon_t$  及び  $\tan \delta_t$  を測定しておく必要がある [19], [20]。

ここでは、室温  $23^\circ\text{C}$  において、 $(Zr, Sn)TiO_4$  誘電体円柱(村田製作所製)を用いて 3 種類の樹脂ガラスクロス積層基板の  $\sigma_{rb}$  測定を行った。まず、 $(Zr, Sn)TiO_4$  誘電体円柱及び銅板の測定結果を表 2 に示す。次に 3 種類の樹脂ガラスクロス積層基板(基板 C, P, M と呼ぶ)の  $\epsilon_t$  及び  $\tan \delta_t$  の測定結果を表 3 に示す。また、3 種類の銅張樹脂ガラスクロス積層基板の  $\sigma_{rb}$  の測定結果及び前節に述べた 2 誘電体共振器法による  $\sigma_{rf}$  の測定結果を表 4 に示す。

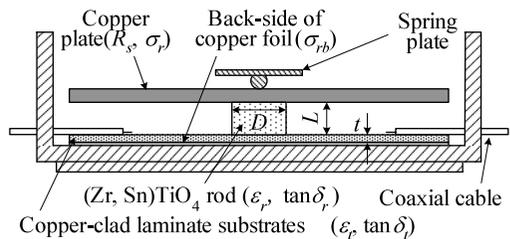


図 13 MIC 形誘電体円柱共振器の構造  
Fig. 13 MIC type dielectric rod resonator.

表 2  $(Zr, Sn)TiO_4$  円柱及び銅板の測定結果  
Table 2 Measured results for  $(Zr, Sn)TiO_4$  rod and copper plate.

$f_0$ (GHz)	$Q_u$	$\epsilon_r$	$\tan \delta_r$ ( $\times 10^{-4}$ )	$R_s$ (m $\Omega$ )	$\sigma_r$ (%)
9.9696 $\pm 0.0005$	2190 $\pm 10$	37.90 $\pm 0.02$	2.08 $\pm 0.02$	26.5 $\pm 0.3$	96.1 $\pm 2.0$

表 3 3 種類の積層基板の  $\epsilon_t$  及び  $\tan \delta_t$  の測定結果  
Table 3 Measured results of  $\epsilon_t$  and  $\tan \delta_t$  of laminate substrates of three kinds.

誘電体基板	$t$ (mm)	$f_0$ (GHz)	$Q_u$	$\epsilon_t$	$\tan \delta_t$ ( $\times 10^{-3}$ )
基板 C	0.741 $\pm 0.002$	11.263 $\pm 0.001$	1530 $\pm 10$	2.997 $\pm 0.006$	3.34 $\pm 0.02$
基板 P	0.536 $\pm 0.001$	11.472 $\pm 0.001$	2180 $\pm 10$	3.001 $\pm 0.005$	3.14 $\pm 0.01$
基板 M	0.825 $\pm 0.002$	10.994 $\pm 0.001$	890 $\pm 10$	3.485 $\pm 0.007$	4.54 $\pm 0.03$

表 4 3 種類の銅張積層基板の  $\sigma_{rb}$  及び  $\sigma_{rf}$  の測定結果  
Table 4 Measured results of  $\sigma_{rb}$  and  $\sigma_{rf}$  of copper clad laminate substrates of three kinds.

試料	$S_p$ (kNm)	$f_0$ (GHz)	$Q_u$	$\sigma_{rb}$ (%)	$\sigma_{rf}$ (%)
銅張基板 C	3.0	9.0138 $\pm 0.0005$	2290 $\pm 10$	19.7 $\pm 0.9$	96.2 $\pm 3.1$
銅張基板 P	2.0	9.2045 $\pm 0.0005$	2420 $\pm 20$	46.7 $\pm 3.4$	94.2 $\pm 4.0$
銅張基板 M	1.5~1.9	8.9513 $\pm 0.0007$	2210 $\pm 10$	14.7 $\pm 0.7$	91.0 $\pm 4.0$

$S_p$ : 銅はく厚さ 35  $\mu\text{m}$  における引き剥がし強さ (メーカカタログ値)

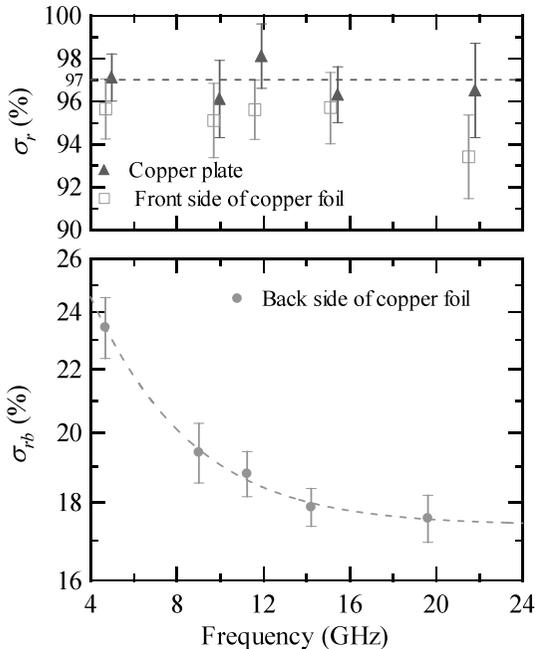


図 14 銅はく表面と裏面の比導電率の測定結果  
Fig. 14 Measured results of relative conductivity of front side and back side of copperfoil, compared with the result of copper plate.

更に、銅張り積層基板 C について、寸法の異なる誘電体円柱を用いて  $\sigma_{rb}$  及び  $\sigma_{rf}$  の周波数依存性を測定した。その結果及び比較のため銅板の  $\sigma_r$  の測定結果を図 14 に示す。銅板と銅はく表面の比導電率については、4~22 GHz にわたり周波数依存性は認められなかった。しかし、 $\sigma_{rb}$  については、面荒らしによる影響により周波数が高くなるほど比導電率が低下することが分かった。

### 5. 適用範囲及び測定精度

これまでに述べた測定法の適用範囲及び測定精度を表 5 及び表 6 にまとめる。これらの測定精度の評価は、使用した共振器及び試料の寸法測定精度、共振周波数及び無負荷  $Q$  の繰返し測定精度を考慮して行われた。詳しくは表中に示した文献を参照されたい。

### 6. む す び

銅張り樹脂ガラスクロス積層基板の材料定数をマイクロ波帯で測定するための種々の測定法を紹介した。これらの測定方法による測定結果はマイクロストリップ構造やコプレーナ構造の平面回路を実際に設計する

表 5 複素比誘電率測定法の適用範囲及び測定精度  
Table 5 Measurement precision and application for complex permittivity measurement methods.

測定法名	$f_0$ (GHz)	$\epsilon_t$ $\frac{\Delta \epsilon_t}{\epsilon_t}$ (%)	$\tan \delta$ $\frac{\Delta \tan \delta}{\tan \delta}$ (%)	文献
円筒空洞共振器法	2~40	1.1~50 $\pm 0.2 \sim 0.5$	$10^{-3} \sim 10^{-6}$ $\pm 2 \sim 10$	[3],[4]
遮断円筒導波管法	30~100	1.1~50 $\pm 0.2 \sim 1.0$	$10^{-3} \sim 10^{-6}$ $\pm 2 \sim 10$	[7]
平衡形円板共振器法	2~30	1.1~10 $\pm 0.5 \sim 1.0$	$10^{-2} \sim 10^{-4}$ $\pm 5 \sim 20$	[10]
2 誘電体円柱共振器法	2~40	2~1000 $\pm 0.2 \sim 0.5$	$10^{-3} \sim 10^{-7}$ $\pm 5 \sim 20$	[16]

表 6 導体平板の比導電率測定法の測定範囲及び測定精度  
Table 6 Measurement precision and application for relative conductivity measurement methods of conductor plates.

測定法名	$f_0$ (GHz)	$\sigma$ (%)	$\frac{\Delta \sigma}{\sigma}$ (%)	文献
2 誘電体円柱共振器法	4~30	10~100	2~10	[16]
MIC 形誘電体円柱共振器法	4~30	10~100	5~15	[19]

際に有用である。

謝辞 本論文をまとめるのにあたり、御協力頂いた  
本学大学院生蓮池健一氏に深謝致します。

### 文 献

[1] 大越孝敬, 三好旦六, 平面回路, オーム社, 1975.

#### [ 平面方向の複素比誘電率の測定 ]

[2] 小林禎夫, 佐藤純也, “空洞共振器法による誘電体平板材料の複素誘電率の非破壊測定,” 信学技報, MW87-53, Oct. 1987.

[3] Y. Kobayashi and J. Sato, “Complex permittivity measurement of dielectric plates by a cavity resonance method,” IEICE Technical Report, MW88-40, EMC88-58, Dec. 1988.

[4] 加屋野博幸, 榊原孝彰, 小林禎夫, “空洞共振器法による誘電体平板の複素誘電率の温度特性の自動測定,” 信学技報, SAT91-82, MW91-75, Nov. 1991.

[5] T. Shimizu and Y. Kobayashi, “Millimeter wave measurements of some low-loss dielectric plates by a novel cut-off circular waveguide method,” Proc. 32nd European Microwave Conf., pp.825-828, Sept. 2002.

[6] T. Shimizu and Y. Kobayashi, “Cut-off circular waveguide method for dielectric substrate measurements in millimeter wave range,” IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, no.5, pp.672-680, May 2004.

[7] 清水隆志, 小林禎夫, “ミリ波誘電体平板誘電率測定における遮断円筒導波管法の測定精度,” 信学論(C), vol.J87-C, no.12, pp.1131-1137, Dec. 2004.

#### [ 垂直方向の複素誘電率の測定 ]

[8] 小林禎夫, 田辺孝哉, 田中周三, “平衡形円板共振器の固有値の計算機解析,” 信学技報, MW74-57, Sept. 1974.

[9] K. Tanabe, Y. Kobayashi, and S. Tanaka, “Numerical analysis of eigenvalue solution of disk resonator,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-23, no.6, pp.508-511, June 1975.

[10] 小林禎夫, 小林 晃, 田中周三, 鈴木康夫, “平衡形円板共振器による複素誘電率測定法,” 信学技報, MW75-76, Oct. 1975.

[11] 小林禎夫, 于 静, “平衡形円板共振器による複素誘電率の自動測定,” 信学技報, MW91-17, May 1991.

[12] 于 静, 小林禎夫, “MIC 誘電体基板の複素誘電率異法性の温度依存性測定,” 信学技報, MW91-94, Oct. 1991.

[13] Y. Kobayashi and J. Yu, “Temperature-dependence measurement of anisotropic complex permittivity for MIC dielectric substrate,” Proc. 1992 Asia-Pacific Microwave Conf., pp.859-862, Aug. 1992.

[14] 川端広一, 小林禎夫, “同軸励振平衡形円板共振器を用いた誘電体平板の複素誘電率測定,” 信学技報, MW2000-157, Dec. 2000.

[15] 蓮池健一, 川端広一, 加藤正之, 馬 哲旺, 小林禎夫, “TM010 モード同軸励振平衡形円板共振器を用いる誘電体平板の複素誘電率の周波数依存性測定,” 信学技報, MW2005-69, Sept. 2005.

#### [ 導体の表面抵抗測定 ]

[16] Y. Kobayashi and M. Katoh, “Microwave measurement of dielectric properties of low-loss materials by dielectric rod resonator,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-33, no.7, pp.586-592, July 1985.

[17] A. Nakayama, Y. Terashi, H. Uchiyama, and A. Fukuura, “Conductivity measurement at the interface between sintered conductor and dielectric substrate at microwave frequencies,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.50, no.7, pp.1665-1674, July 2002.

[18] 小林禎夫, 工藤 浩, “円柱と平板により構成される誘電体共振器の電磁界解析,” 信学技報, MW89-55, July 1989.

[19] 高市 亮, 青木俊之, 小林禎夫, “誘電体共振器を用いた銅張誘電体基板の銅箔裏面の表面抵抗測定,” 信学技報, MW2003-141, Sept. 2003.

[20] 高市 亮, 青木俊之, 小林禎夫, “3 種類の銅張誘電体基板の銅箔裏面の比導電率測定,” 信学総大, C-2-125, March 2004.

[21] 高市 亮, 小林禎夫, “銅箔裏面の導電率の周波数依存性測定,” 信学ソ大(エレクトロニクス), C-2-67, Sept. 2004.

(平成 17 年 10 月 5 日受付)



小林 禎夫 (正員:フェロー)

昭 38 都立大・工・電気卒。昭 40 同大大学院修士課程了。同年埼玉大学理工学部助手。昭 63 同大学工学部教授。平 17 埼玉大学名誉教授, 地域共同研究センター客員教授。マイクロ波工学, 特に, 誘電体フィルタ, 高温超電導平面フィルタ, 誘電体材料及び高温超電導材料の測定に関する研究に従事。工博。IEEE Fellow。平 7 科学技術振興事業団井上春成賞受賞。