

## ミリ波同軸励振空洞共振器法による 誘電体平板の複素誘電率測定

清水隆志

小林禧夫

埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科  
〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255  
電話: 048-858-3477, Fax: 048-857-2529  
E-mail: yoshio@reso.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 本報告では、ミリ波帯において、低損失誘電体平板材料の複素誘電率を測定するために、モードマッチング法による厳密な数値解析に基づいた同軸励振空洞共振器法を提案する。

この測定方法を用いて、GaAs 平板、PTFE 平板、Crythnex 平板の複素誘電率を室温において測定した。また、GaAs 平板の複素誘電率の周波数依存性を 10GHz-40GHz の範囲で測定した。

キーワード ミリ波 同軸励振 複素誘電率測定

## Millimeter wave measurements of complex permittivity of dielectric plates by a cavity resonance method based on coaxial excitation

Takashi Shimizu and Yoshio Kobayashi

Dept. Electrical and Electronic System, Saitama University  
Shimo-ookubo 255, Urawa, Saitama 338-8570, Japan  
Phone: +81-48-858-3477, Fax: +81-48-857-2529  
E-mail: yoshio@reso.reso.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract A novel circular resonance method based on a rigorous analysis by the mode matching technique is proposed to measure the complex permittivity of low loss dielectric plates accurately in the millimeter wave region.

By this method, the complex permittivity for GaAs plate, PTFE plate and Crythnex plate were measured at room temperature, and the frequency dependence of complex permittivity for GaAs plates were measured in the frequency range 10 to 40 GHz. It is verified that this method is useful as a precise measurement method of the permittivity of low loss dielectric plates in the microwave and millimeter wave regions.

Key words Millimeter wave Coaxial cable excitation Complex permittivity measurement

## 1. はじめに

空洞共振器法は、誘電体平板試料の比誘電率  $\epsilon_r$  と誘電正接  $\tan\delta$  を、マイクロ波帯において非破壊かつ高精度に測定する方法として知られている [1]-[3]。この方法では誘電体平板材料を長さ方向に2等分した空洞の間に挟み構成する。 $\epsilon_r$  と  $\tan\delta$  は  $TE_{0m1}$  モードの共振周波数  $f_0$  と無負荷  $Q$ 、 $Q_u$  より計算することができる。

近年、ミリ波帯において、励振及び検波にWRJ-500 方形導波管を用いた誘電体平板の測定が行われている [4][5]。しかしながら、この方法では共振器の構造上、挿入損失の調整が容易ではない。現在ではミリ波帯においても、同軸系によって構成される Vector network analyzers を利用できる。

本報告では、励振及び検波に同軸線路を用いることにより、50GHz にて誘電体平板材料の複素誘電率を正確に測定することができる同軸励振空洞共振器法を提案する。

## 2. 測定原理

図1にRitz-Galerkin法による解析図を示す。比誘電率  $\epsilon_g$ 、厚さ  $g$  の支持誘電体に挟まれた比誘電率  $\epsilon_r$ 、厚さ  $t$ 、直径  $d$  の誘電体平板が直径  $D$ 、高さ  $H$  の導体空洞の間に置かれる。試料の  $\epsilon_r$  と  $\tan\delta$  は  $TE_{011}$  モードの共振周波数  $f_0$  と無負荷  $Q$ 、 $Q_u$  の測定値から、モードマッチング法による厳密な解析 [1] に基づいて開発された Windows 用プログラムを用いて求めることができる。

$\epsilon_r$ 、 $\tan\delta$  は次式で求められる。

$$\det F(f_0; \epsilon_r, \epsilon_g, t, g, D, H, d) = 0 \quad (1)$$

$$\tan \delta = A / Q_u - BR_s \quad (2)$$

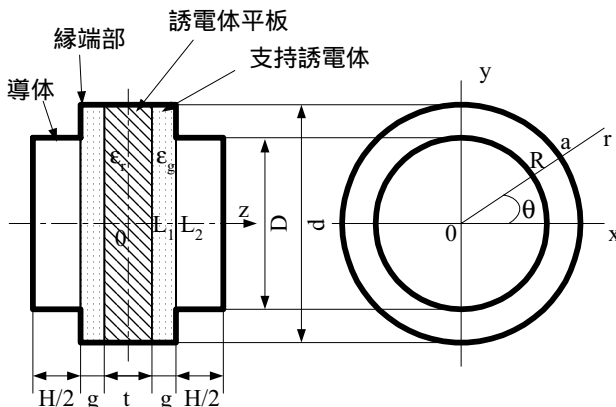


図1 解析図

さらに、 $R_s$  は導体空洞の表面抵抗であり、次式で与えられる。

$$R_s = \sqrt{\pi f_0 \mu_0 / \sigma} \quad (\Omega) \quad (3)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (\text{H/m}) \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_0 \sigma_r \quad (5)$$

$$\sigma_0 = 58 \times 10^6 \quad (\text{S/m}) \quad (6)$$

ここで、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $\sigma$ 、 $\sigma_0$  はそれぞれ導体の導電率、万国標準軟銅の導電率であり、比導電率  $\sigma_r$  は後述のように空洞の  $Q_u$  の測定値より実験的に決定される。また、 $A$  と  $B$  は  $D$ 、 $H$ 、 $g$  の導体摂動による共振周波数の摂動量から計算される定数であり、次式により与えられる。

$$A = \frac{f_0}{-\left(\frac{\Delta f_0}{\Delta \epsilon_r}\right)} \quad (7)$$

$$B = \frac{1}{120\pi k_0 \epsilon_r \Delta f_0} \left( \frac{\Delta f_0}{\Delta H} + \frac{\Delta f_0}{\Delta R} + \frac{\Delta f_0}{\Delta g} \right) \quad (8)$$

## 3. 共振器構造

図2(a)は50GHzでの測定に用いた空洞共振器の構造を示す。この共振器は誘電体平板試料を挟むために、直径  $D$ 、長さ  $H$  の導体円筒空洞が中央で2つに分割されている。円筒空洞の両端部の溝は、縮退している  $TM_{11p}$  モードの共振周波数を  $TE_{01p}$  モードから分離するためのものである。空洞共振器の励振及び検波は、短絡板側より先端に微小ループを持つ UT-47 セミリジッド同軸線路 (外径 1.2mm) によって行われる。誘電体平板の  $\epsilon_r$ 、 $\tan\delta$  を測定する前に、あらかじめ空洞共振器の  $D$ 、 $H$ 、 $\sigma$  を測定しておく必要がある。ここで、 $D$  と  $H$  は  $TE_{013}$  と  $TE_{014}$  モードの共振周波数  $f_0$  の測定値から、 $\sigma_r$  は  $TE_{013}$  モードの  $f_0$  と無負荷  $Q$ 、 $Q_u$  から求められる [3]。表1にその測定結果を示す。

厚さ  $t$  の誘電体平板試料は図2(b)に示すように2つに分割された共振器の間に挟み、クリップで固定される。この時、不要な空洞共振モードを抑制するために、円筒空洞の両端に電波吸収材をおく。高精度な測定を行うために  $TE_{0m1}$  モードを用い、先端にループを持つ同軸線路により円筒側面から励振を行う。このような空洞共振器構造で、 $D = 3\text{mm}$  にすれば、100GHzでの材料測定が可能である。

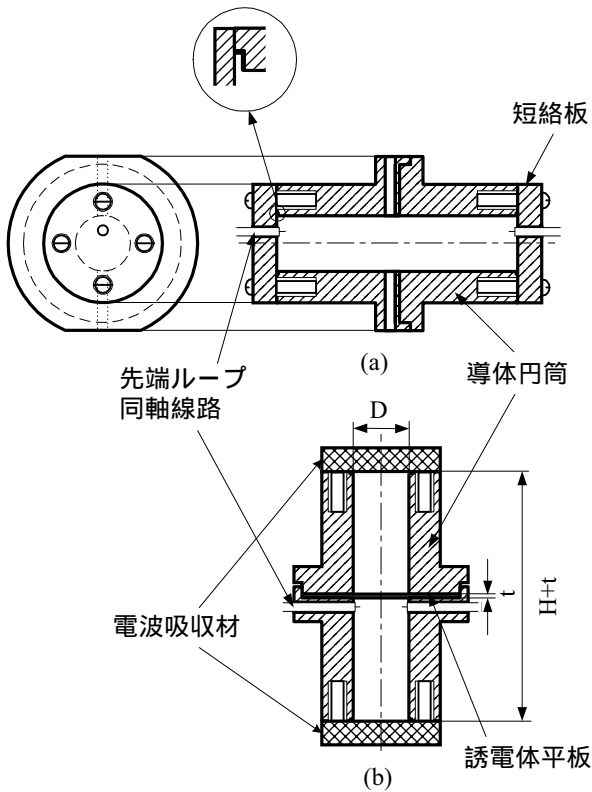


図2 測定に用いる共振器の断面図

- (a) 空洞共振器
- (b) 誘電体を挿荷した共振器

表1 空洞共振器の測定結果 (at 20 )

Mode	$f_0$ (GHz)	$Q_u$ for $TE_{013}$	D (mm)	H (mm)	$\sigma_r$ (%)
$TE_{013}$	$54.300 \pm 0.002$	10180	6.985	31.150	61.0
$TE_{014}$	$55.770 \pm 0.001$	$\pm 60$	$\pm 0.001$	$\pm 0.010$	$\pm 0.7$

#### 4. モードチャートによるモード判別

図2(b)で縁端効果を無視した空洞共振器を考える。この時、 $TE_{nmp}$ と $TM_{nmp}$ モードの特性方程式は次式で与えられる [3]。

$$u \tan(u - p \pi/2) = v \tag{9}$$

$$u \tan(u - p \pi/2) = \epsilon_a v \tag{10}$$

ただし、

$$u = \left( \frac{\pi t f_0}{c} \right) \left[ \epsilon_a - \left( \frac{c j_{nm}^{(l)}}{\pi D f_0} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{11}$$

$$v = \left( \frac{\pi t f_0}{c} \right) \left[ \left( \frac{c j_{nm}^{(l)}}{\pi D f_0} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \tag{12}$$

ここで、 $j'_{nm}$ は第一種ベッセル関数の微分 $J'_n(j_{nm}) = 0$ の第m番目の根であり、 $j_{nm}$ は第一種ベッセル関数 $J_n(j_{nm}) = 0$ の第m番目の根である。

式(9)(10)を用いて、Dとtを与えると、 $\epsilon_a$ (縁端効果を無視した比誘電率)の関数として、すべての共振モードの共振周波数を計算し、モードチャートを作成するプログラムを開発した。図3はD = 6.985mm、t = 0.607mmのGaAs平板のモードチャートである。図3中の破線は $\epsilon_r$ の測定に用いる $TE_{011}$ 、 $TE_{021}$ モードを示している。このモードチャートは後述するように未知の $\epsilon_r$ を持つ誘電体平板の測定に役立つ。

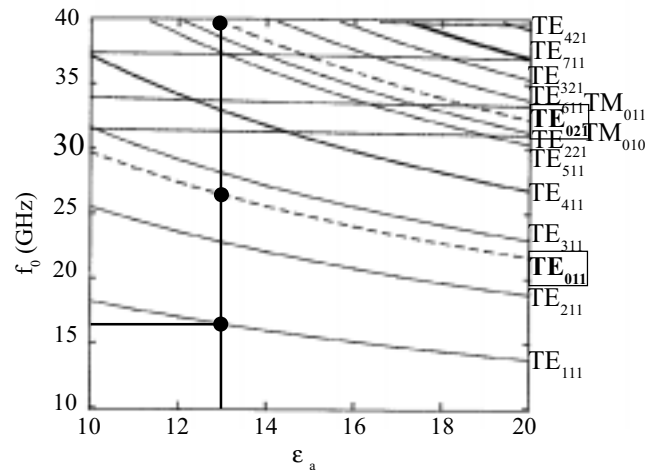


図3 D = 6.985mm、t = 0.607mmのモードチャート

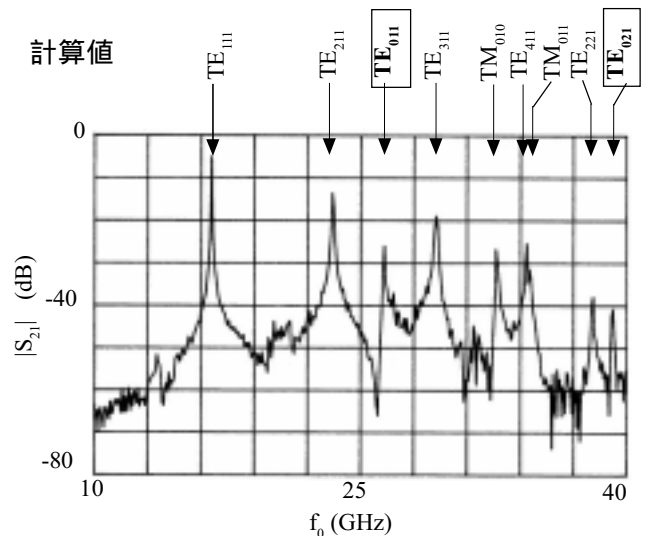


図4 GaAs 平板を挟んだ時の周波数応答とモードチャートより計算された共振周波数によるモード判別

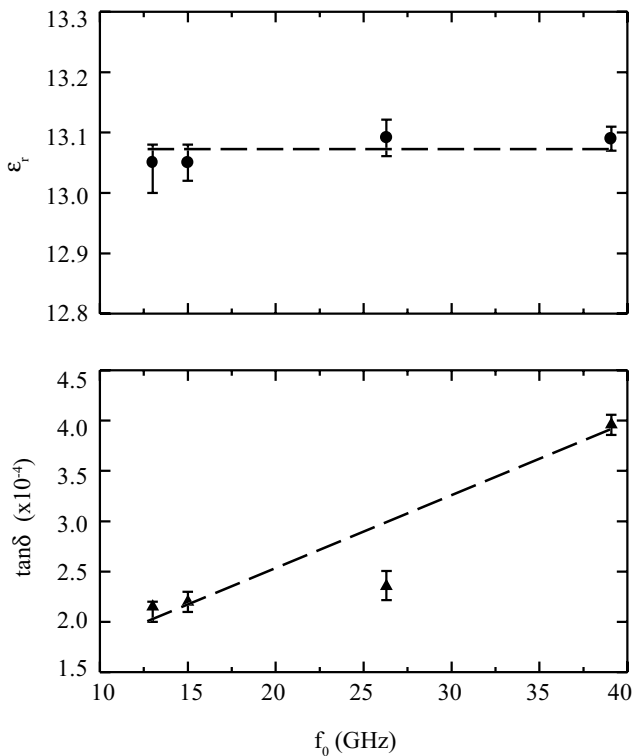


図5 GaAs 平板の測定結果

表2 PTFE 平板と Crythnex 平板の測定結果

材料	t (mm) $\pm \Delta t$	$f_0$ (GHz) $\pm \Delta f_0$	$Q_u$ $\pm \Delta Q_u$	$\epsilon_r$ $\pm \Delta \epsilon_r$	$\tan\delta$ $\pm \Delta \tan\delta$ ( $\times 10^{-4}$ )
PTFE	0.932 $\pm 0.022$	47.055 $\pm 0.001$	4440 $\pm 180$	2.099 $\pm 0.018$	1.98 $\pm 0.16$
Crythnex	0.823 $\pm 0.046$	46.459 $\pm 0.004$	4070 $\pm 170$	2.375 $\pm 0.010$	2.40 $\pm 0.18$

図4は図2(b)の構造での周波数応答の測定結果を示す。モードチャートより計算された共振周波数から、測定された共振波形のモードを容易に判別することができる。また、図4の上に判別した各モードを示す。この場合、最も低い共振周波数17GHzがモードチャートから  $TE_{111}$  モードであることがわかる。これより、 $\epsilon_a$  が約13である。また、図4に示すように、 $TE_{011}$  モードの  $f_0$  が26.5GHz、 $TE_{021}$  モードの  $f_0$  が39GHzであると予想される。

## 5. 測定結果

$t=0.607$ mmのGaAs平板の周波数依存性の測定を室温20にて行った。図5にその測定結果を示す。13GHzと15GHzの測定結果は寸法の異なる他の2つの空洞共振器によるものであり、26.5GHzと39GHzの測定結果は図2(b)に示す共振器の  $TE_{011}$ 、 $TE_{021}$

モードを用いて測定したものである。これらの測定結果は参考文献[6]に示す値とよく一致している。参考文献[4]では、GaAs平板の  $\epsilon_r$  は約10であるが、これは測定に使用する共振モードを間違えたためである。

また、PTFE平板とCrythnex平板の複素誘電率測定を室温にて行った。表2にその測定結果を示す。これらの測定結果は参考文献[4]に示す値と誤差の範囲内で一致している。

## 6. まとめ

同軸励振空洞共振器法は、50GHzのミリ波帯において、低損失材料誘電体平板材料の  $\epsilon_r$  と  $\tan\delta$  の測定に有効であることが実証された。また、本法は100GHzまでの測定に有効であると期待される。

## 謝辞

本研究に際し、GaAs材料のご提供を頂いた株式会社日立製作所中央研究所の近藤博司氏、Crythnex平板をご提供いただいた富士通カンタムデバイス株式会社の平地康剛氏、実験装置の製作にご尽力いただいた埼玉大学の加藤正之技官に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Y.Kobayashi and J.Sato, "Nondestructive measurement of complex permittivity of dielectric plate materials by a cavity resonance method," 信学技報, MW87-53, pp.41-48, Oct. 1987.
- [2] Y.Kobayashi and J.Sato, "Complex permittivity measurement of dielectric plates by a cavity resonance method," 信学技報, MW88-40, EMCJ88-58, Nov. 1988.
- [3] G. Zhang and Y. Kobayashi, "Complex permittivity measurement of dielectric plates using the lowest  $TE_{111}$  mode of a circular cavity resonator," 1996 China-Japan Joint Meeting on Microwaves, Proc., p32-35, Apr. 1996.
- [4] 中岡, 小林; "50GHz帯における空洞共振器法による誘電体平板の複素誘電率の温度依存性の測定", 信学技報, MW97-118, pp.27-30, Nov. 1997.
- [5] G. Zhang, S. Nakaoka, and Y. Kobayashi, "Millimeter wave measurements of temperature dependence of complex permittivity of dielectric plates by the cavity resonance method," 1997 Asia Pacific Microwave Conf. Proc., pp.913-916, Dec. 1997.
- [6] W. E. Courtney, "Complex permittivity of GaAs and CdTe at microwave frequencies," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-25, pp.697-701, Aug. 1977.