信学技報 TECHNICAL REPORT OF IEICE. ED2000-188,MW2000-145(2000-11)

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の温度依存性の測定

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:048-858-3487, Fax:048-857-2529 E-Mail: shimizu@reso.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし ミリ波同軸励振空洞共振器法による低損失誘電体平板材料の温度依存性測定を提案する。本測定法は、モードマッチング法による厳密な解析にもとづき、縁端効果まで考慮した複素誘電率を高精度に測定可能である。また、直径 1.2mm の同軸線路および V コネクタを採用したミリ波同軸系温度 依存性自動測定システムを構築し、高能率な測定が可能である。さらに、PTFE 平板、Crythnex 平板の複素誘電率の温度依存性を 20-300K の範囲で測定し、その有効性を実証した。

キーワード ミリ波 空洞共振器法 同軸励振 複素誘電率測定 温度依存性

Millimeter wave measurements of temperature dependence of complex permittivity of dielectric plates by a cavity resonance method with coaxial excitation

Takashi Shimizu

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: shimizu@reso.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract A novel circular resonance method based on a rigorous analysis by the mode matching method is proposed to measure the temperature dependence of complex permittivity of low loss dielectric plates in the millimeter wave region. Using 1.2mm semi-rigid coaxial cable and V connectors performed constructing an automeasurement system applicable to 60GHz. Then the temperature dependence for PTFE plate and Crythnex plate were measured in the temperature range 20 to 300K. It is verified that this method is useful as a precise measurement method of the temperature dependence of low loss dielectric plates.

Key word Millimeter wave Coaxial cable excitation Complex permittivity measurement

1. はじめに

最近、ミリ波帯の応用研究が盛んに行われ、各種 誘電体材料のミリ波帯での複素誘電率(比誘電率*ε*_r、 誘電正接 tan のを正確に測定することが求められて いる。低損失誘電体材料のミリ波帯における測定法 として、ガウシアンビーム共振器法^{[1][2]}、NRD ガイ ド励振誘電体共振器法^{[3][4]}、ウィスパリングギャラ リーモード共振器法^{[5][6]}、導波管励振空洞共振器法^[7] 等が報告されている。

ガウシアンビーム共振器法は、共振器および測定 装置全体が大きいため、クライオスタット内に測定 装置を配置することは困難であり、温度変化に伴う 共振器の変形により、鏡面の精度が劣化し、複素誘 電率測定の精度が低下すると考えられる。また、 NRD ガイド励振誘電体円柱共振器法やウィスパリ ングギャラリーモード共振器法は、温度変化に伴う 誘電体励振線路の変形により、共振器の結合量の調 整が容易でない。

一方、空洞共振器法による温度依存性測定法は、 すでにマイクロ波帯で確立されており^[8]、電磁界解 析に基づく厳密解によって、高精度に計算を行える ^[9]。また、ミリ波帯において、同軸励振空洞共振器 法による常温での複素誘電率測定法は、すでに確立 されている^{[10][11][12]}。そこで、ミリ波帯において、同 軸励振空洞共振器法を用いた誘電体平板の複素誘電 率の温度依存性測定法を提案する。

本報告では、50GHz 帯における PTFE 平板、 Crythnex 平板の複素誘電率温度依存性の測定結果に ついて報告する。さらに、ミリ波材料測定用円筒空 洞共振器の設計方法についても述べる。

2. 測定原理^[10]

本測定では、まず図 1(a)に示す空洞共振器の用い て、直径 D (mm)、長さ H (mm)および比導電率 σ_r (%) をあらかじめ求めておく必要がある。ここで、D、Hは TE_{01p} TE_{01q} (p, q=1,2,...)モードの共振周波数 f_0 よ リ、 σ_r は D、H および TE_{01p} モードの無負荷 Q、 Q_u より求められる。つぎに、図 1(b)に示すように、厚 さ t (mm)の誘電体平板をこの空洞の中央に装荷し、 遮断 TE_{01p} モード誘電体円板共振器を構成する。比 誘電率 ϵ_r は TE_{0m1}(m=1,2,...)モードの共振周波数 f_0 の 測定値より、また、誘電正接 tan δ は無負荷 Q、 Q_u の 測定値より、図 1(c)に示すモードマッチング法によ る厳密な解析から求められた測定公式を用いて、縁 端効果まで考慮した値が求められる。これらの共振





$$\det F(f_0; \varepsilon_r, \varepsilon_g, t, g, D, H, d) = 0$$
$$\tan \delta = A/Q_u - BR_s$$

ただし、

$$\begin{split} A &= -f_0 / \left(\Delta f_0 / \Delta \varepsilon_r \right) \\ B &= \frac{1}{240\pi^2 \varepsilon_r} \frac{1}{\left(\Delta \varepsilon_r / \Delta f_0 \right)} \left(\frac{\Delta f_0}{\Delta H} + \frac{\Delta f_0}{\Delta R} + \frac{\Delta f_0}{\Delta g} \right) \\ R_s &= \sqrt{\pi f_0 \mu_0 / \sigma} \quad (\Omega) \\ \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \ (H / m) \\ \sigma &= \sigma_0 \sigma_r \qquad \sigma_0 = 58 \times 10^6 \ (S / m) \\ \text{c:} \\ \vdots \\ \vdots \\ \end{split}$$

図 1 測定に用いる共振器の構造図

- (a) 空洞共振器
- (b) 導体円筒遮断導波管内に誘電体平板を装荷した共振器
- (c) 測定公式

器の励振および検波は、先端に微少ループを持つ外径 1.2mmの UT-47 セミリジッド同軸線路を用いて、 半径方向より行う。



図 2 空洞共振器のモードチャート



図 3 空洞共振器の電磁界分布

3. 空洞共振器の設計

3.1 空洞共振器の寸法の決定

空洞共振器の直径 D は、TE₀₁₁ モードの共振周波 数が50GHz付近となるように7.0 mmとした。次に、 空洞共振器のモードチャートを作成した(図 2)。空 洞共振器の寸法及び比導電率 σ, の測定に使用する TE_{01p} モードが他のモードと近接しないように寸法 比 D/H を選択し、0.226、0.268、0.294 と決定した。 その寸法比より、空洞共振器の長さ H はそれぞれ 31.0 mm、26.1 mm、23.8 mm となる。

3.2 励振方法と励振孔位置の検討

D、*H* 及び*σ*,の測定に使用する TE_{01p} モードは縮退 する TM_{11p} モードが存在し、無負荷*Q*、*Q*_uの測定に 悪影響を与える。そこで、空洞共振器の電磁界分布 に着目し、TM_{11p} モードの励振を抑制する方法を検 討した。

図 3 に空洞共振器の電磁界分布を示す。半径方向 から円筒中央(z 0)で励振すると、円筒中央の管壁 $(z=0, r=\pm D/2)$ において、 TM_{11p} モードは H_z 成分が 存在しないため励振されない。しかし、モード次数 p が偶数次の TE_{01p} モードも同様の理由で励振され ない。そこで、導体円筒の分割位置を中央から 0.5mm だけずらし、偶数次の TE_{01p} モードも励振できるよ うにした(図 2 中 点線)。また、同軸線路の微小 ループの面を z 軸に対して、完全に垂直にすれば、 TM_{11p} モードは抑制されるが、実際にループの面を 完全に垂直にすることは困難である。そこで、 TE_{01p} モードと縮退する TM_{11p} モードを分離するために、 リング状の溝を導体の両端に入れた(図 1(a))。

3.3 短絡板の影響

空洞共振器に誘電体を装荷したときに、導体両端 に短絡板を配置すると、空洞共振器の高次モードが 測定周波数付近に低下してくる。このモードは、誘 電率測定時のモード判別を困難にし、測定に影響を 与える。そこで、導体両端に電波吸収体を配置した。



図 4 短絡板の影響

その周波数応答を図 4 に示す。また、図の上部に モードチャートからの計算値を示す。電波吸収体を 配置した場合、短絡板の時に比べ、高次モードが抑 制されていることが分かる。

4. 温度依存性自動測定システム

直径 1.2mm のセミリジッド同軸線及び V コネク タの採用により、ミリ波帯において同軸系温度依存 性自動測定システムを構築した^[13]。このシステムを 用いることで高能率に温度依存性の測定を行える。 写真 1 にクライオスタット内に設置された測定装置 を示す。

共振器の $f_0 \geq Q_u$ の測定は周波数掃引法により行う。共振器はクライオスタット内に設置し、室温よ り最低到達温度(約 20K)にまで十分冷却した後、冷 却器の振動をなくして測定を行うために、冷却器の スイッチを止める。温度が自然上昇する際に、コン ピュータが温度計の温度を監視しながら、ネットワ ークアナライザ上の共振波形を Q_u 測定の最適の状 態に制御し続け、1K の温度変化毎に $f_0 \geq Q_u$ を自動 測定する。

これらの値から本研究室で開発したソフトを用い て、空洞共振器の寸法及び*o*,と複素誘電率を計算す る。

5. 測定結果

5.1 複数個の共振器による複素誘電率測定

複数個の空洞共振器を製作し、同一の誘電体平板 の複素誘電率測定をそれぞれの共振器で行った。

まず、空洞共振器の *D*、*H* 及び*σ*,の測定結果を表 1 に示す。ここで、*D*、*H* は測定に使用できる全ての TE_{01p} モードの組み合わせによる測定結果の平均値 であり、*σ*,は TE₀₁₁ モードによるものである。但し、 50KA01 のみ、TE₀₁₃ によるものである。

つぎに、TE₀₁₁ モードを用いて測定した Crythnex 平板 (*t*=0.823 ± 0.006mm)の複素誘電率を表 2 に示 す。

50KA01 の*ɛ*, の測定値が高い原因は、誘電体平板 を挟んだときに生じる隙間の影響であると考えられ る。この隙間は、空洞共振器内部を鏡面研磨する際 に生じたものである。

5.2 低誘電率基板の温度依存性

測定に使用する空洞共振器 50KC02 の温度依存性 を 20-300(K)の範囲で、TE₀₁₁ モードを用いて測定し た。その結果を図 5(a)に示す。



写真 1 測定装置

Cavity	f ₀ (GHz)	Qu	D (mm)	H (mm)	σ _r (%)
50KA01	54.300	10180	6.985	31.150	61.0
(TE_{013})	± 0.002	± 60	± 0.001	± 0.010	± 0.7
50KC01	52.520	11300	6.990	30.917	87.1
	± 0.001	± 70	± 0.002	± 0.079	± 0.9
50KC02	52.647	11250	6.993	23.770	84.6
	± 0.001	± 40	± 0.006	± 0.258	± 1.5
50KA02	52.649	11360	6.985	26.118	86.2
	± 0.001	±100	± 0.002	± 0.106	± 1.5

表 1 空洞共振器の寸法と比導電率 at 25

表 2 Crythnex 平板の測定結果 (t=0.823mm、for TE₀₁₁ 25)

Cavity	<i>f</i> ₀ (GHz)	Qu	E r	tan δ (x10 ⁻⁴)
50KA01	46.459	4070	2.375	2.40
	± 0.004	± 170	± 0.007	± 0.18
50KC01	46.645	4240	2.332	2.62
	± 0.003	± 60	± 0.010	± 0.06
50KC02	46.644	4110	2.330	2.74
	± 0.001	± 50	± 0.012	± 0.05
50KA02	46.730	4130	2.322	2.74
	± 0.003	± 80	± 0.010	± 0.08

図 5(a)の結果を用いて、50GHz 帯で *t*=0.930 (mm)、 線膨張係数τ=100 (ppm/K)の PTFE 平板と *t*=0.823 (mm)、τ=70 (ppm/K)の Crythnex 平板の温度依存性を 20-300(K)の範囲で、TE₀₁₁モードを用いて測定した。 その結果を図 5(b),(c)に示す。常温付近で tanδがばら ついている原因は、測定器の雑音による影響で *Q*_u の測定値がばらついたためである。



図 5 空洞共振器と誘電体平板の温度依存性

PTFE 平板は 170K、290K 付近で f_0 に変曲点があり、 150K 以下で tan δ が 0.5 × 10⁻⁴ になることが分かった。 また、Crythnex 平板は、常温付近で tan δ が一定にな る傾向があることが分かった。

また、これらの測定結果は、参考文献[7]に示す導 波管励振空洞共振器法の測定値と誤差の範囲内で一 致した。

6. まとめ

ミリ波帯における低損失低誘電率誘電体材料の複 素誘電率の温度依存性測定法として、同軸励振空洞 共振器法を提案し、実際に 50GHz 帯において、PTFE 平板、Crythnex 平板の*ε*, と tan *8*の温度依存性測定を 行い、その有効性を実証した。また、空洞共振器を 製作する際に、共振器の合わせ目に隙間が生じない ように製作する必要があることを実証した。

今後の課題は、本測定法を高誘電率材料に適応す ること、高次モード TE_{0m1} (m=2,3,...)による測定を可 能にすること等である。

謝辞

本研究に際し、電波吸収材をご提供いただいた株 式会社 TDK の三浦太郎氏、Crythnex 材料をご提供 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] A.L.Cullen and P.K.Yu;"The accurate measurement of permittivity by mean of an open resonator," Proc. Roy Soc. A, vol.325, pp.493-509, 1971.
- [2] Ph. Coquest, T.Matsui and M.Kiyokawa;"Dielectric Measurement in the 60-GHz Band Using a High-Q Gaussian Beam Open Resonator," IEICE Trans. On Electronics, E78-C, pp.1125-1130, 1990.
- [3] 石川,田中,西田,西川; "NRD ガイドを用いた
 ミリ波用誘電体共振器材料の複素誘電率測定
 法,"信学技法, MW90-13, pp.31-36, 1990.
- [4] 中山,福浦,西村; "NRD ガイド励起誘電体共振
 器によるミリ波導電率と複素誘電率測定,"信
 学総大, SC-2-10, pp.448-489, Mar. 1997.
- [5] 古神,松村;"ウィスパリングギャラリーモード 共振器を用いた低誘電率誘電体材料のミリ波 複素誘電率測定,"信学論,J83-C,6,pp.553-558, June, 2000.
- [6] 古神, 松村; "ウィスパリングギャラリーモード 共振器を用いたミリ波誘電体材料の温度特性 の測定,"信学総大, C-2-120, pp.171, Mar, 2000.
- [7] 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.

- [8] 加屋野,榊原,小林;"空洞共振器法による誘電 体平板材料の複素誘電率の温度特性の自動測 定,"信学技法, MW91-75, pp.117-124. 1991.
- [9] Y.Kobayashi, J.Sato; "Complex permittivity measurement of dielectric plates by a cavity resonance method," Papers of Technical Group on Microwaves, Inst. Elect. Inf. Commun. Engns. Jap., EMCJ88-58, MW88-40, pp.43-50, Nov. 1988.
- [10] 清水,小林; "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," 信学技報, MW99-25, pp.73-76, May,1999.
- [11] 清水,小林;"空洞共振器法(低損失誘電体平板 測定),"信学ソ大, PC1-3, pp.311-312. Sep. 1999.
- [12] 清水, 篠原, 小林; "空洞共振器法による高誘電 率基板の複素誘電率測定," 信学総大, C-2-117, pp.168.
- [13] 吉川,橋本,小林;"ミリ波帯における YBCO 薄膜の表面抵抗測定",信学技法,MW2000-80, pp.35-40. Aug.2000.