

# WG モード共振器法による 積層基板材料の誘電率異方性測定に関する検討

渡邊 渉 中村 雅人 清水 隆志 菊池 幸市 古神 義則

宇都宮大学大学院工学研究科 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2

E-mail: kogami@cc.utsunomiya-u.ac.jp, tshimizu@cc.utsunomiya-u.ac.jp

**あらまし** ウィスパーリングギャラリーモード共振器法を用いてガラスクロス誘電体積層基板のミリ波誘電率測定を行い、面方向及び厚み方向の比誘電率を評価した。評価に用いた測定法の原理について説明し、種々の基板材料の評価結果を示す。また遮断円筒導波管法による同じ材料の測定結果も併せて示し、今回得られた測定結果の妥当性を明らかにする。

**キーワード** ウィスパーリングギャラリーモード、誘電率異方性測定、ミリ波、マイクロ波

## Evaluation of millimeter wave anisotropic permittivities of the dielectric laminate substrates using WG resonator method

Wataru WATANABE, Masato NAKAMURA, Takashi SHIMIZU

Koichi KIKUCHI and Yoshinori KOGAMI

Graduated School of Engineering, Utsunomiya University Yoto7-1-2, Utsunomiya-shi, Tochigi 321-8585 Japan

E-mail: kogami@cc.utsunomiya-u.ac.jp, tshimizu@cc.utsunomiya-u.ac.jp

**Abstract** The planar anisotropy of the relative permittivity of the dielectric laminate substrate is evaluated by using Whispering-Gallery mode dielectric resonator method. The measuring procedure is described and the measuring results are shown in this report. Furthermore the measured results for the same material with the cut-off cylindrical wave guide method are compared with those of the presented method, to show the validity of these measured results.

**Keyword** Whispering-Gallery mode, permittivity measurement, millimeter-wave, micro wave

### 1. まえがき

近年、ミリ波回路構成材となる誘電体基板の高精度な複素誘電率測定が要求されている。本研究室では、ミリ波帯における低損失誘電体材料の複素誘電率測定法としてウィスパーリングギャラリーモード(WGモード)誘電体共振器法を提案している[1][2]。

WGモード誘電体共振器は、図1に示すように誘電体円板と励振及び検波用の二本の誘電体線路で構成される。WGモード誘電体共振器法の特徴は次のとおりである。1. 共振器の構成に遮蔽導体を用いないため、導体損の影響を受けない。2. 広い周波数帯にわたって周期的に現れる複数の共振応答を測定に用いることができるので、一つの円板試料に対して比誘電率 $\epsilon_r$ 、誘電正接 $\tan\delta$ の周波数依存性を測定できる。3. 偏波面が異なる2つの共振モードを用いることで、円板の厚み方向と面方向の比誘電率が異なる一軸異方性誘電体の誘電率異方性測定が可能である。

これまでにWGモード誘電体共振器法を用いて、異

方性を有しない低損失誘電体円板や一軸異方性を有するサファイア円板の複素誘電率異方性測定を行ってきた[3]。

本研究では、回路基板としてよく用いられる比較的比誘電率の低い積層基板の誘電率異方性測定に関して検討を行ったので報告する。

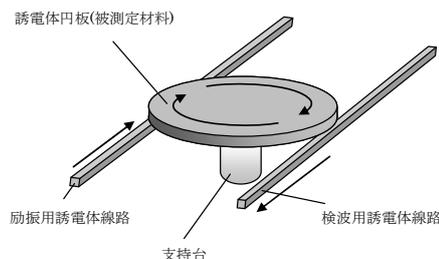


図1 WGモード誘電体共振器

## 2. 測定原理

WGモード誘電体共振器の共振特性の解析構造を図2に示す。直径 $D(=2R)$ 、厚さ $t(=2L)$ 、 $r\phi$ 面方向の比誘電率 $\epsilon_t$ 、 $z$ 方向の比誘電率 $\epsilon_z$ をもつ誘電体円板が間隔 $2h$ で配置された平行平板間の中央に置かれた構造である。

平行平板形のモードマッチング法[4]の固有値方程式は、固有モードを級数展開し、各領域での電磁界成分に境界条件を適用することで(1)式に示す行列式となる。

$$\det H(f_0; \epsilon_t, \epsilon_z, n, L, h, D) = 0 \quad (1)$$

ただし、共振周波数 $f_0$ 、誘電体円板の周方向のモード次数 $n$ である。

比誘電率は、図3に示すような比誘電率評価チャートより求められる。この比誘電率評価チャートは(2)式で定義される $n$ 次の共振周波数間隔 $F_n$ を用いて作成する。

$$F_n = \frac{f_{n+1} - f_{n-1}}{2} \quad (2)$$

ただし、この $f_n$ は(1)式を用いて算出する $f_0$ から求まる。

異方性を測定するには図4に示す電界の偏波方向が円板の半径方向に向いているWGEモード、厚み方向に向いているWGHモードを用いる。積層基板のような平行方向と垂直方向の比誘電率 $\epsilon_t$ 、 $\epsilon_z$ が違う材料では、WGEモードを用いたとき $\epsilon_t$ の影響を受け、WGHモードは双方の影響を受けることが知られている[5]。

## 3. $\epsilon_t, \epsilon_z$ 評価方法

$\epsilon_t, \epsilon_z$ を評価する手順を以下に示す。

- ① WGE, WGHそれぞれのモードで $f_0$ を測定する。
- ②  $\epsilon_z = \epsilon_t$ としてWGEモードの比誘電率判別チャートを作成し、測定値と比較することで $\epsilon_t$ を評価する。
- ③  $\epsilon_t$ を②で求めた値として、WGHモードの比誘電率判別チャートを作成し $\epsilon_z$ を評価する。
- ④ ③で評価した $\epsilon_t, \epsilon_z$ の値を用いて、もう一度WGEモードの比誘電率判別チャートを作成し、 $\epsilon_t, \epsilon_z$ を決定する。

## 4. WGモードの共振特性の測定

図5に共振周波数と無負荷Q値の測定システムの模式図を示す。

周波数掃引法により行う。マイクロ波発振器からのマイクロ波信号を増幅器、通倍器により増幅、通倍しミリ波信号を得る。励振用誘電体線路(PTFE)を介して円板内にWGモードを励振させ、検波用誘電体線路よりその透過特性を取り出し、アナライザ上で観測する。そして、測定すべきWGモード共振応答より共振周波数および無負荷Q値を測定する。共振器と線路間の結合量の制御は、円板と線路間の距離の調整により行う。

円板共振器固有の特性を測定するためには疎結合状態で行うことが必要である[6]。

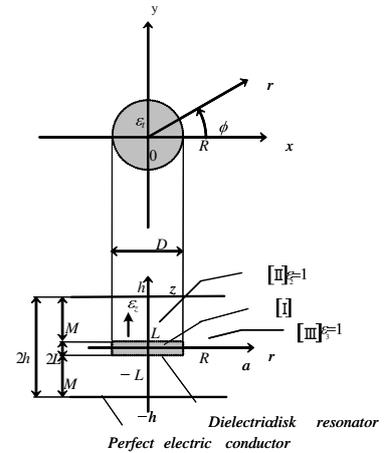


図2 平行平板形モードマッチング法による解析構造及び座標系

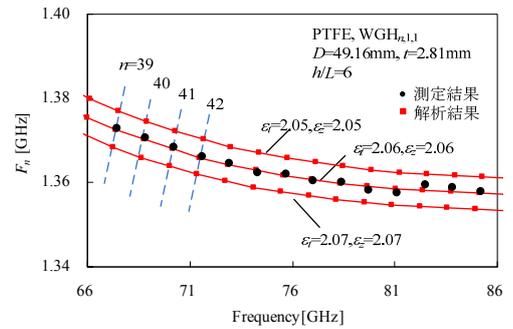


図3 比誘電率評価チャートの一例

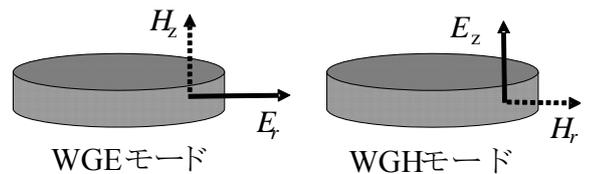


図4 WGEモード、WGHモードの偏波

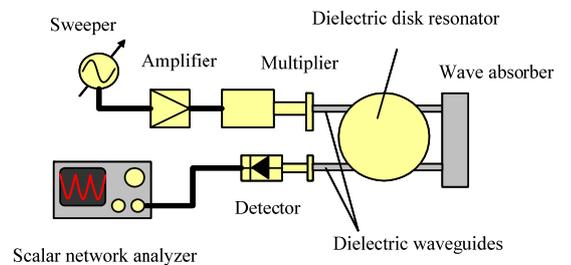


図5 測定システムの模式図

## 5. 誘電率異方性の測定結果

### 5.1 測定試料

測定試料は PTFE 円板, LCP 円板, ポリスチレン円板の 3 種類である. LCP とは 1 枚 100 $\mu\text{m}$  の LCP 材を複数枚重ねて熱プレスにより成形したものであり, ポリスチレンとはポリスチレン樹脂に補強材としてグラスファイバーを配合した複合材料である.

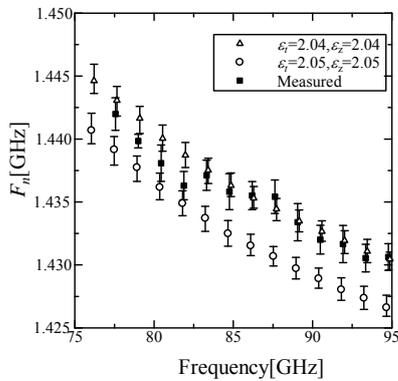
試料寸法を表 1 に示す. 測定結果は, 直径はノギス, 厚さはマイクロメータを用いてそれぞれ 10 箇所測定した平均値と測定誤差である.

表 1 測定試料の寸法

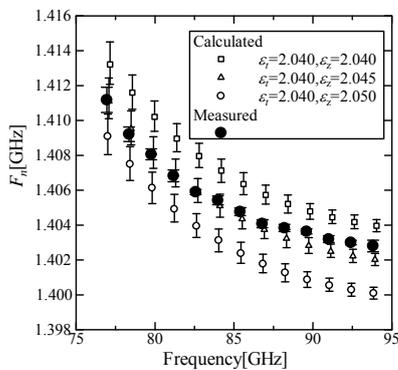
試料名	直径 $D(\text{mm})$	厚さ $t(\text{mm})$
PTFE	$47.72 \pm 0.03$	$2.635 \pm 0.041$
LCP	$42.68 \pm 0.03$	$2.045 \pm 0.007$
ポリスチレン	$39.80 \pm 0.13$	$1.736 \pm 0.011$

### 5.2 $\epsilon_t, \epsilon_z$ の測定結果

PTFE 円板, LCP 円板, ポリスチレン円板の  $f_n$  の測定結果と比誘電率評価チャートをそれぞれ図 5, 図 6, 図 7 に示す. 黒印が測定結果, 白ぬき印が計算結果となっている. 測定は温度  $26 \pm 3^\circ\text{C}$ , 湿度  $37 \pm 5\%$  の下で行い, それぞれ 5 回測定した平均値と測定誤差を示す. 計算結果の誤差は寸法の測定誤差によるものである.

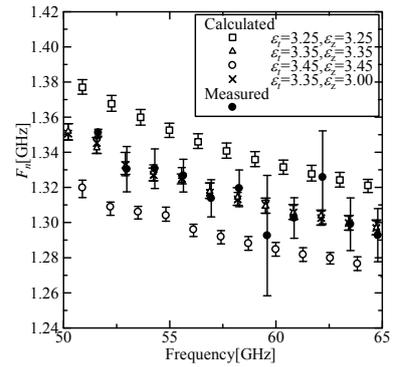


(a) WGE モード

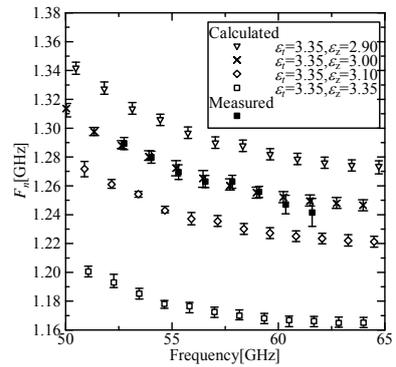


(b) WGH モード

図 6 PTFE の測定結果と判別チャート

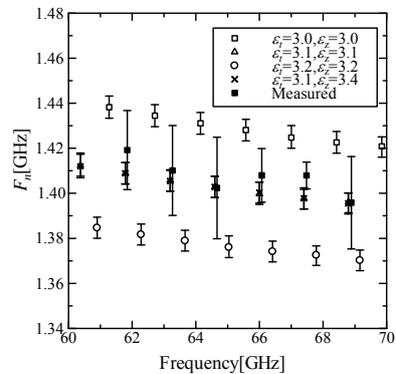


(a) WGE モード

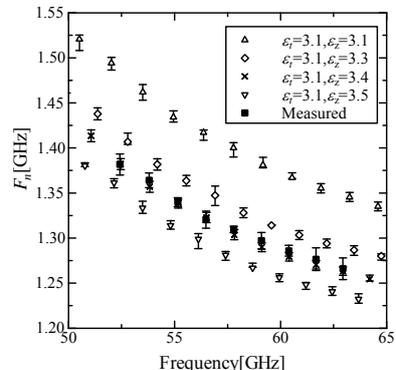


(b) WGH モード

図 7 LCP の測定結果と判別チャート



(a) WGE モード



(b) WGH モード

図 8 ポリスチレンの測定結果と判別チャート

LCP, ポリスチレンでは WGE での測定帯域, WGH での測定帯域が異なっている, これは  $WG_{n11}$  モードのみを励振できる周波数帯域が励振線路寸法によって決まり, その測定が可能な帯域でのみ測定を行ったからである. 図6~8により決定した  $\epsilon_t$ ,  $\epsilon_z$  の測定結果を表 2 に示す. PTFE は有効数字を 3 桁とした時の値となっている.

表 2  $\epsilon_t$ ,  $\epsilon_z$  の測定結果

試料名	$\epsilon_t$	$\epsilon_z$
PTFE	2.04±0.01	2.04±0.01
LCP	3.35±0.10	3.00±0.10
ポリスチレン	3.1±0.1	3.4±0.1

PTFE 円板を両方のモードを用いて測定した結果, どちらのモードでも 2.04±0.01 となり, 異方性を持たないことを確認した. LCP は  $\epsilon_t$  が  $\epsilon_z$  に対して 9.3% 大きい異方性が測定された. ポリスチレンでは  $\epsilon_t$  が  $\epsilon_z$  に対して 11% 小さい異方性が測定された.

### 5.3 遮断円筒導波管法による測定結果との比較

遮断円筒導波管法[7]では, 基板の平行方向の比誘電率  $\epsilon_t$  の測定が可能である. 同一の試料から作り出した PTFE 平板(厚さ 0.965±0.007mm), LCP 平板(厚さ=0.776±0.004mm), ポリスチレン平板(厚さ 0.515±0.009mm) を測定した結果をそれぞれ表 3 に示す. 測定結果はそれぞれ 5 回ずつ測定した平均値と誤差である. また共振器は直径 7.011±0.001mm, 高さ 30.959±0.002mm のものを用いた.

表 3 遮断円筒導波管法での測定結果

	$\epsilon_t$
PTFE	2.037±0.008 (47GHz)
LCP	3.418±0.011 (42GHz)
ポリスチレン	3.247±0.043 (46GHz)

PTFE の  $\epsilon_t$  は, WG モード共振器法の測定結果と誤差内で一致した. LCP の測定結果は WG モード共振器法を用いた値よりも 9.7% 大きい値となった. ポリスチレンの測定結果は WG モード共振器法を用いた値よりも 4.8% 大きい値となった. 原因として, WG モードを励振する際, 高次モードの影響を受けてしまっていること, また遮断円筒導波管法に用いる基板作成の際の基板の表面の凹凸の影響により, 測定値に影響を与えているなどが考えられる. これら差異に関しては今後の研究課題である.

## 6. むすび

WG モード誘電体共振器法を用いて, 各種積層基板の平行方向と垂直方向の比誘電率をミリ波帯で測定し

た.

その結果, 異方性を持たない PTFE の  $\epsilon_t$ ,  $\epsilon_z$  は同じ比誘電率が得られた. 一方, LCP とポリスチレンが異方性を持つことを明らかにした. これより, WG モード共振器法は低誘電率積層基板の誘電率異方性測定が行えることを確認した.

## 謝辞

測定試料を御提供頂いた日本ピラー工業株式会社関係者様に深く感謝します.

## 参考文献

- [1] 古神 義則, 松村 和仁, “ウイスパリングギャラリーモード共振器法を用いた低誘電率材料のミリ波複素誘電率測定,” 信学論(C), J-83-C, no.6, pp.553-558, Jun. 2000.
- [2] 古神 義則, 田村 先, 松村 和仁, “ウイスパリングギャラリーモード共振器法によるミリ波誘電体材料の測定,” 信学技法, MW98-116, Nov. 1998.
- [3] 小幡 洋史, 古神 義則, “異方性誘電体材料のミリ波誘電率測定に関する検討,” 信学技法, ED2004-179, MW2004-195, pp.37-42, Nov. 2004.
- [4] 大澤 悟, 中村 雅人, 清水 隆志, 古神 義則, “WG モード共振器法によるミリ波誘電体基板材料の複素誘電率測定に関する検討,” 信学技法, MW2009-188, pp.53-58, June. 2010
- [5] Y. Kobayashi, T. Senju, “Resonant Modes in Shielded Uniaxial-Anisotropic Dielectric Rod Resonators,” IEEE Trans. on microwave theory and tech., vol.41, no.12, pp.2198-2205, Dec. 1993.
- [6] 古神 義則, 田村 先, 松村 和仁, “ウイスパリングギャラリーモード共振器法による 100GHz 帯複素誘電率測定,” 信学論(C), J-84-C, no.8, pp.703-706, Aug. 2001.
- [7] T. Shimizu, 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.