

【ミリ波誘電体の誘電率測定 球】

1・目的

近年注目を集めているミリ波帯電波を利用するためには、低損失なミリ波回路素子の開発が重要となる。特に、重要な回路構成材料である誘電体材料の低損失化が必要とされており、その評価法の確立が求められている。これまで、著者らは電磁界が誘電体側面で全反射しながら伝播するウィスパリングギャラリーモード（以下 WG モード）誘電体円板共振器を用いた誘電率測定法を検討してきた。ただし、円板共振器の厳密な電磁界解析は難しく、何らかの近似を用いるために、誘電率測定の結果には少なからず系統的な誤差が生じる恐れがある。そこで、今回は厳密解析が簡単に行える球状共振器の利用を試みる。本稿では、誘電体球共振器の電磁界解析を行い、誘電率測定に応用した。そして、実際に 50 - 110GHz 帯にて行った PTFE 材の測定結果を示す。

2・誘電体球共振器における電磁界解析

2 - 1・電磁界解析の手法

比誘電率 ϵ_{r1} 及び比透磁率 μ_{r1} を持つ誘電体球共振器の WG モードによる電磁界は、 r 方向に対する TM 球面波と TE 球面波の和によって表される。そして、これらの式を線形結合することにより球共振器内部の電磁界分布を表すことが出来る。

次に、これらの式に誘電体球共振器の境界条件を適用する。誘電体球共振器内部を伝搬する電磁波の伝搬定数を k_1 、周囲媒質を伝搬する電磁波の伝搬定数を k_2 としたとき、各成分における境界条件より導き出される方程式の未知数は A_{nm} 、

B_{nm} 、 C_{nm} 、 D_{nm} の 4 つとなるので、次のような

4 行 4 列の行列方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} E_{\theta A} & E_{\theta B} & E_{\theta C} & E_{\theta D} \\ H_{\theta A} & H_{\theta B} & H_{\theta C} & H_{\theta D} \\ E_{\phi A} & E_{\phi B} & E_{\phi C} & E_{\phi D} \\ H_{\phi A} & H_{\phi B} & H_{\phi C} & H_{\phi D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{nm} \\ B_{nm} \\ C_{nm} \\ D_{nm} \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

ただし、各成分の添字は順に、成分方向と成分に対応する未知数を示している。

(1) が非自明、つまり意味のある解を得るためには次の固有値方程式を満足しなくてはならない。

$$\det \begin{bmatrix} E_{\theta A} & E_{\theta B} & E_{\theta C} & E_{\theta D} \\ H_{\theta A} & H_{\theta B} & H_{\theta C} & H_{\theta D} \\ E_{\phi A} & E_{\phi B} & E_{\phi C} & E_{\phi D} \\ H_{\phi A} & H_{\phi B} & H_{\phi C} & H_{\phi D} \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

(2) の解を用いることによって 4 つの未知数を求めることができる。

そのようにして導出された固有値方程式に誘電体球共振器の各パラメータを代入し、固有値方程式を満足する複素共振周波数 $f_0 : f_r + jf_i$ ($f_r > 0, f_i > 0$) を求めることができる。このようにして得られた複素共振周波数により、

誘電体球共振器の共振周波数 f_0 と Q 値 Q_f を次式によって求めることができる。

$$\begin{cases} f_0 = |f_r + jf_i| \\ Q_f = \frac{f_r}{2f_i} = \frac{\omega_r}{2\omega_i} \end{cases} \quad (3)$$

2 - 2・固有値の計算

ここで、固有値の計算例を図 2 に示す。なお、解析モデルは $WGE_{N,M,L}$ モードとし、 N,M,L はそれぞれ球座標における θ 方向, ϕ 方向, ψ 方向のモード次数を表す。計算に用いた値は表 1 に示したもので、周波数の実部のみを変化させていったときの結果である。図を見てみると、0~50GHz まで周波数を変化させたときは、図 2(a) のように指数関数的に $|\det [W]|$ の値が減少しているのが見て取れる。次に、50~100GHz まで周波数を変化させたときは、図 2(b) のように $|\det [W]|$ が極小となる周波数がいくつか存在していることが見て取れる。この極小点付近で、固有値方程式を満足する複素共振周波数を数値的に見出す。

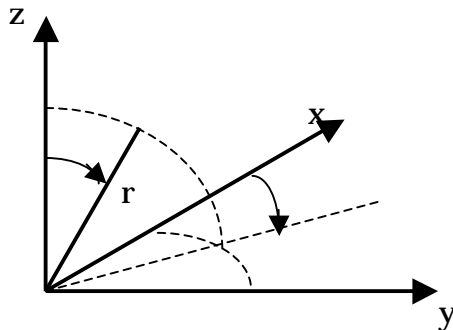


図 1 球座標変換

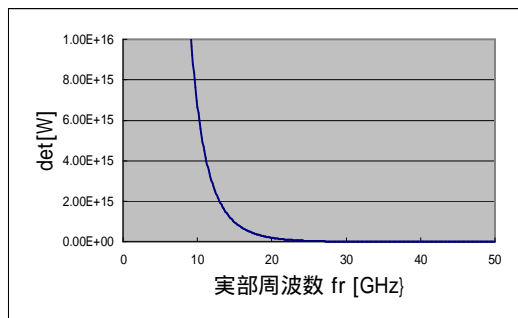


図 2(a) 固有値方程式の解 (1)

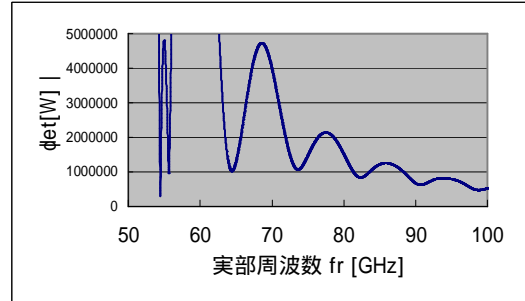


図 2(b) 固有値方程式の解 (2)

表 1 シミュレーションで用いた値

半径 a [mm]	15
比誘電率 ϵ_r	2
比透磁率 μ_r	1
誘電正接 tan δ	0.0002
N, M, L	20, 1, 1
周波数の虚部 [MHz]	100

2 - 3・球共振器と円板共振器の比較

前節の計算を行うことにより、誘電体球共振器の複素共振周波数 f_0 及び無負荷 Q を求める手段を得た。そこでこの計算法により、一般に用いられている誘電体円板共振器との比較を行った。誘電体円板共振器の解析には実効誘電率法を用いた。なお、試算に用いた各共振器の寸法及び材料定数を表 2 に示す。

円板及び球共振器の無負荷 Q 値 Q_u を試算した結果を図 3 に示す。グラフを比較してみると、円板共振器に比べ Q 値が小さくなっていることが分かる。また、最大 Q 値をとった直後の減少が円板共振器に比べ小さく、 Q 値の周波数依存性が低いことが分かる。そのことより球共振器の場合、ほとんど同じ共振特性をもつ周方向次数の異なる共振モードが比較的広い周波数範囲に連続して現れるものと考えられる。

したがって測定においては、これらの共振モードに対して、ほぼ同じ条件で励振・検波を行えるため、例えば誘電率測定に応用する場合、周波数に依存する系統的な測定誤差を抑えられる見込みがある。

表 2 比較のための試算モデル(材質：テフロン)

	円板共振器	球共振器
半径 a [mm]	30	30
高さ h [mm]	3.0	
比誘電率 ϵ_r	2.04	
誘電正接 tan	3.0×10^{-4}	

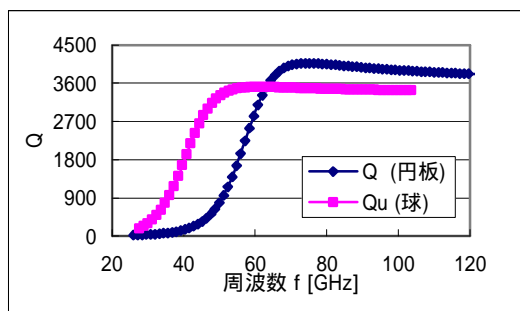


図 3 形状の違いによる無負荷 Q 値の比較

3・測定方法および測定結果

図 4 に測定システム、図 5 に実際に用いている測定装置の写真を示す。測定は周波数掃引法により行う。測定により得られた透過特性より、着目する WG モードの共振ピークを判別し、その共振周波数と無負荷 Q 値を測定する。なお、無負荷 Q 値は電力半値幅法より測定する。

これにより、方向共振次数 N を測定しなくても実験値と計算値の比較が行える。また、本測定では一つの試料において、周期的に現れる共振モードを使用しているため、広帯域にわたって測定することにより精度の向上が期待できる。

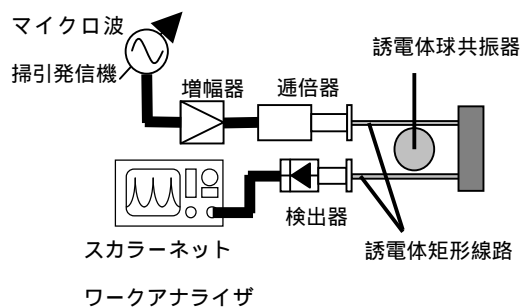


図 4 測定システム

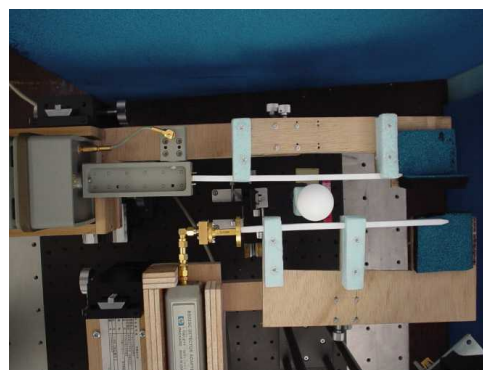


図 5 測定装置

3-2・共振周波数における $IL_0 - Q$ 特性

本測定ではテフロン製の球誘電体を用いて測定を行った。なお、今回用いた球誘電体の半径 a は 16.978mm, 励振用及び検波用の誘電体矩形線路には断面寸法 2.0mm 及び 2.5mm, 3.0mm 角のテフロン線路を選択した。

測定の結果を図 6 に示す。挿入損失 IL_0 の値が 45 [dBm] を越えたあたりから、特に矩形線路が大きいほど高次モードの影響により Q 値の測定が困難となるので、飽和が始まる 35 ~ 40 [dBm] 程度で測定を行うのが好ましいと思われる。

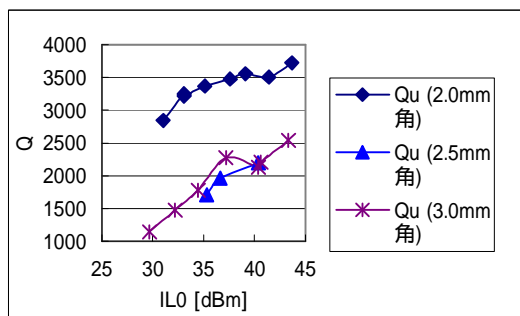


図6 $f_0 = 103.424$ [GHz]における
 $IL_0 - Q$ 特性 ($a=16.978$ mm, WGE モード)

3-3 共振周波数および無負荷 Q 値の測定

3-2 における測定結果より、以後検波用線路には 2mm 角の線路を用いる。

WGH モード及び WGE モードを用いた場合の測定結果を並べて図 7・8 に示す。それぞれ比誘電率 ϵ_r または誘電正接 $\tan \delta$ を変化させてシミュレーションしたものを測定結果と共に表示させている。図 7 を見てみると、測定値が WGH モード・WGE モード共に 2.04 の結果と一致していることが見て取れる。よって共振周波数の比較を行うことで、使用している誘電体球共振器の比誘電率 ϵ_r を高精度に測定することができる。また、図 8 の $f_N - Q_u$ 特性のグラフでは、誘電正接 $\tan \delta$ が $(3.0 \pm 1.0) \times 10^{-4}$ のときのシミュレーション結果内に収まっていることが見て取れる。よって比誘電率と同様に、 $f_N - Q_u$ 特性のグラフを用いることで、共振器の誘電正接 $\tan \delta$ も比誘電率と同様に測定することができる。

発表文献

- 【1】小野寺 崇, 松原 真理, 苜米地 義郎, 古神 義則: “誘電体球共振器を用いたミリ波誘電率測定”, 電気情報通信学会技術研究報告, MW2004-129, P.27, 2004

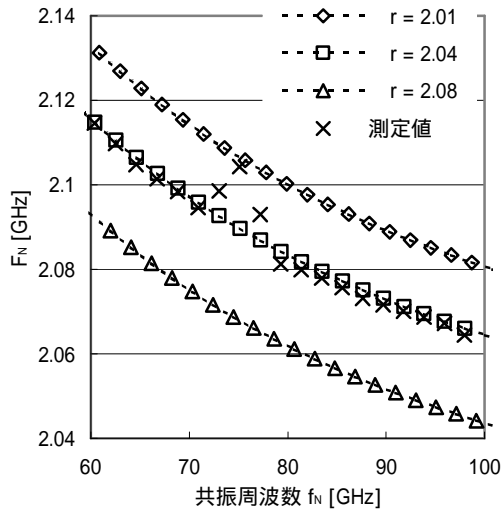
しかし、WGH モードの測定結果は無負荷 Q 値 Q_u が不安定なものとなってしまった。これは WGH モードにおいては電磁エネルギーの伝搬が十分に行われていないためと考えられる。しかし、球共振器の寸法によってもアナライザ上での出力安定性なども異なるため、他の寸法および材質における測定も今後行い、検討を重ねていく必要がある。

4・まとめ

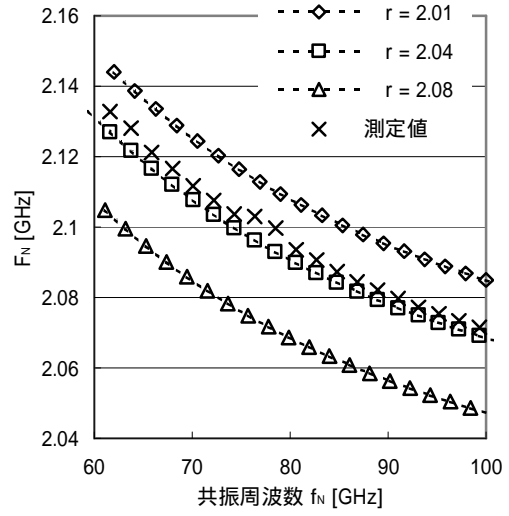
本研究では、WG モード誘電体球共振器の電磁界解析、固有値方程式を導出し、この式から複素共振周波数 f_0 を得た。また、逆に求められた複素共振周波数 f_0 を用いて、材料定数を変化させたときの無負荷 Q 値の算出を行い、円板共振器の比較も行った。さらに、50 ~ 110GHz 帯におけるテフロン球の共振周波数および無負荷 Q 値を実際に測定し、理論値との比較を行った。

その結果、WGE モードについては理論値と同様なめらかな共振特性が得られたものの、WGH モードについては透過電力及び Q 値に乱れが現れてしまった。しかし、測定値が理論値どおりにならなかったため、さらに精度の良い測定方法を考える必要がある。

そこで本研究の今後の課題としては、励振・検波方法の検討を重ねる、他の寸法・材料の誘電体球共振器の共振特性を測定・解析する、などが挙げられる。

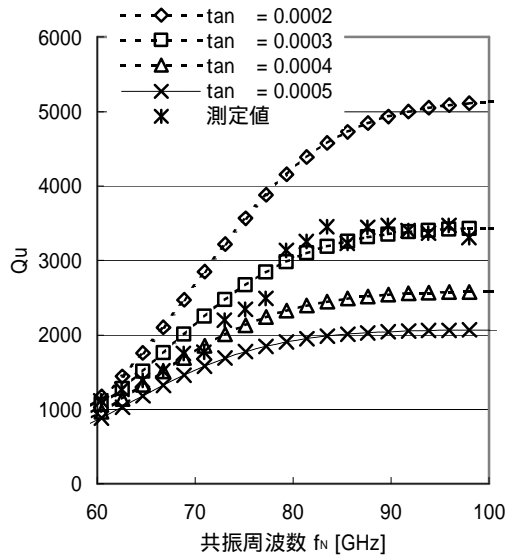


(a) WGH モード

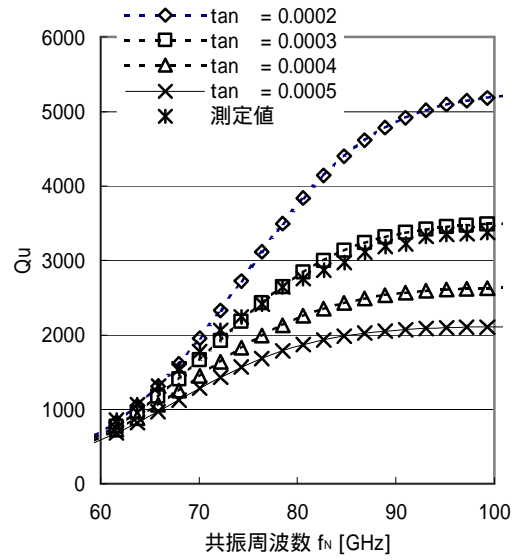


(b) WGE モード

図 7 測定値との比較による比誘電率 ϵ_r 評価



(a) WGH モード



(b) WGE モード

図 8 測定値との比較による誘電正接 $\tan \delta$ 評価