高周波用セラミックス誘電体材料の測定法

Evaluation of Ceramics Dielectrics for RF Use

三浦 太郎*

1. はじめに

情報伝達的手段として電波が利用されてから、伝達に必要なとされる時間が飛躍的に短縮された。情報の密度は電波の周波数に比例して増加させることができるので、情報量の増加に伴って通信に利用される電波の周波数は年々高周波（短波長）側に移動しており、電波を利用した民生用無線機器の大きさも使用波長の短縮に合わせてように小型化が図られている。

電波を効率よく使用するには、広い周波数範囲の電波から目的とする周波数を正確に選択して受信したり、正確な周波数で送信しなければならない。周波数選択にはフィルタ、デュプレクサなどの回路が使用され、これらの回路は共振器と呼ばれる素子で構成されている。従来の構成では一素子当たり半波長程度のスペースが必要で、共振素子の小型化を図るのが無線機器小型化の大きな課題となっていた。

VHF帯からUHF帯における小型で周波数選択性の良い共振素子を開発するために高誘電率・低温度係数・低損失のセラミックス誘電体が続々開発され、それらを利用した誘電体フィルタやデュプレクサが無線機器の小型化に大きく寄与した。この開発過程の中で高周波用誘電体の誘電率向上、低温度係数・低損失化が大きく進展し、誘電体に新しい分野を切り開いたことと、これらの誘電体を評価する手段が飛躍的に進歩したのは良く知られている通りである。

使用周波数がさらに高周波側の準マイクロ波帯に移行

すると、部品の充填密度増加により一層の小型化を図る必要が生じてきた。このような小型化への要求を満たすものとして、多層誘電体基板で回路を構成することが試みられている。多層誘電体基板では、誘電体と導体を同一の基板内に構成するため、導体を焼成前のシート（グリーン・シート）上に印刷して、スタックしてから誘電体と共に焼成（コファイア）しなければならない。従来のエレクトロ・セラミックスは焼成温度が1,250℃以上であり、導体ペーストとセラミックス基板を同時に焼成することはできなかった。

小型化への要請が強まる中で、導体との同時焼成を可能にする新たな誘電体開発が始められ、それに相応しい性能評価法も求められている。このような技術の流れを考慮しながら、高周波用セラミックス誘電体の評価法につき概観し、誘電体定数とセラミックス性能に応じた最適評価法について述べてみたい。

2. 高周波における誘電体評価法

高周波における誘電体評価法を大別して示すと Fig. 1 のようになる。このダイアグラムにも示されているように、伝送線路法と摂動法は試料を充填しない状態を基準にして試料挿入時の変化から誘電率を求める比較法であるのに対し、共振器法は誘電体を共振器としてその共振特性から誘電体定数を求める直接法といえる。一方、伝送線路法では線路の伝搬定数測定として線路を構成している誘電体を評価するのに対し、摂動法と共振器法では共振器の中の挙動として誘電体を評価している。

このように、高周波における誘電体評価法は、誘電体をどのようにみるかという立場、結果算出法の違いなどの組み合わせで決まり、各々の方法に固有な形状や機器

*Taro Miura
TDK/TDK Corporation

Fig.1 Dielectric constant measuring method.

の測定精度の制限によって最適の測定分野が決まる。つまり、高周波においても誘電体は決して一つの方法によって評価されるのではなく、材料定数や試料の形態によって最適の方法が選ばれることになる。このような観点から、ダイアグラムに示した各々の方法について測定原理と最適試料条件などを簡単に解説してみる。なお、ここでは測定法の詳細などに触れる余地もなく、全ての方法に通暁しているわけでもないので、詳細については文末にあげた参考資料を参照していただきたい。

2.1 伝送線路法

この方法は線路に誘電体を充填すると伝搬定数が $\sqrt{\epsilon}$ (ϵ は損失も含んだ複素誘電率とする)だけ変化することに着眼して伝搬定数測定から誘電体定数を算出する方法であり、誘電体の無い線路の値が基準となるので『伝送線路を使用した比較法』のカテゴリーに入る測定法である。伝送線路には導波管が使用されることもあるが、準マイクロ波帯以下では少ない試料で簡単に計測できる同軸線路が使用される。この伝送線路法は線路の形態により、さらに、一端を開放または短絡して線路のインピーダンス測定により評価する反射法と線路内に誘電体を充填して伝搬定数から評価する透過法に分類される。

一ダンス測定により評価する反射法と線路内に誘電体を充填して伝搬定数から評価する透過法に分類される。

伝送線路法では、いずれも線路に隙間無く誘電体が充填されていると仮定して誘電率を算定するので、内外の導体と試料が充分接触しないと測定誤差が大きくなりやすい。この方法で測定するにあたっては他の方法とデータを照合するなどの方法で結果の信憑性を確認するのが望ましい。

(1) 反射法

この測定法は高周波における誘電体の測定法としては最も古典的な方法であり、誘電体を電磁波の中で測定しようとした最初の方法でもある¹⁾。

線路としては Fig. 2 に示すように、一端を短絡または開放してある試料ホルダーに誘電体を充填した形態で、その場合のインピーダンスは各々次式のようにになる。

$$Z = (Z_0 / \sqrt{\epsilon}) \tan (2 \pi \ell / \lambda) \Omega \quad (1)$$

$$Z = (Z_0 / \sqrt{\epsilon}) \cot (2 \pi \ell / \lambda) \Omega \quad (2)$$

ただし、 Z_0 ：線路の特性インピーダンス (Ω)

ϵ ：誘電体の複素誘電率

λ ：試験周波数の波長、 ℓ ：線路長

このホルダーと誘電体を充填しないホルダーのインピーダンスを古典的な定在波測定器や最新のベクトル・ネットワーク・アナライザにより Fig. 3 のような構成で測定して、測定周波数と試料長を先の公式に代入して比較すれば複素誘電率が逆算できる。誘電率には損失部分が含まれているのでインピーダンスも複素数で与えられ、式中の三角関数も複素数形式に拡張する必要があるが、

Fig.3 Measuring system of reflection method.

Fig.2 Sample holder for reflection method (A part of outer conductor is removed).

(1)と(2)式を複素数に拡張すればポケット型コンピュータでも十分な精度で計算できる簡易な方法である。

反射法では開放部には電界しか存在せず短絡部には磁界しか存在しないので、波長に比べて充分薄い(0.1波長以下)試料を短絡部または開放部に挿入すればそれぞれ誘電率と透磁率の分離測定もできる。試料が波長に比べ無視できない厚さの常磁性誘電体の場合には、どちらの方式でも誘電率が測定できて、低い誘電率を測定する場合には一端開放方式が精度良く、高誘電率・高損失の誘電体を測定する場合には一端短絡方式が良いとされている。しかし、一端開放の試料ホルダーでは Fig. 2 に示すように開放端の電界の広がりやを正確にコントロールできないので、試料長に算定誤差が生じやすい。

一端短絡型のホルダーでは、短絡端における電界をショートできるので試料長の算定誤差を小さくできる。ただし、試料充填と非充填時のインピーダンス偏差が小さいので、誘電率が低いとインピーダンス測定誤差のために算定誤差が大きくなる。

このような問題点を解消するために短絡と開放を組み合わせて測定する方法も『プローブ法』として実用化されている²⁾。この方法でも試料とプローブの接触状態により測定精度が左右されることには変わりなく、他の方法に比べて試料の加工や測定手順が簡易であるという点が長所である。結局、反射法による評価は他の方法では測定精度が確保できない、高誘電率・高損失の誘電体測定において頼りになる方法で、現在では主に抵抗型電波吸収体の素材評価に採用されている。

(2) 透過法

Fig. 4 Sample holder for transmission method.

Fig. 5 Measuring system of transmission method.

この方法は、Fig. 4 に示すようなホルダーに誘電体を充填して試料充填・非充填時の伝搬定数の差から複素誘電率を算定する方法である。長さ l の誘電体を充填した同軸管の伝搬定数は次の式で与えられるので、

$$E(l) = E_0 \exp(j2\pi l / \lambda \sqrt{\epsilon}) \quad (3)$$

この線路と誘電体を充填しない線路の位相変化と減衰を Fig. 5 に示すようにベクトル・ネットワーク・アナライザにより測定して、測定周波数と試料長を(3)式に代入して比較すれば複素誘電率が算定できる。

しかし、実際の測定治具では誘電体装荷線路と無装荷線路の境界で反射があり、さらに線路内の減衰が少ない場合には境界間多重反射の影響も考慮しなければならない。複素誘電率と伝搬定数の関係は非常に複雑になる。現在ではソフトも含めた透過法の測定装置が『Sパラメータ測定装置』として販売されているので、そのような製品を利用するほうが良いであろう³⁾。

繰り返し述べているように、伝送線路法では内外の導体と試料が充分接触しないと測定誤差が大きくなり、導電性誘電体においては特にこの影響が大きい。しかるに試料の挿入し易さと導体との接触は相反する要請で、接触を改善すれば試料の挿入が困難になり、容易に挿入できるような寸法では導体との接触が不十分になる。実際に公表されている測定結果を他の方法による結果と比較してみても、接触不十分なために生じたと思える差異が特に大きく(Q値50以下)、他の方法では測定できないような場合にのみ導体間の接触に充分留意して採用すべきであろう。

2.2 摂動法

摂動法は複素誘電率の高精度測定分野では最も早い時期に確立された方法である。この方法は共振器の電界最大部分に小さな棒状または薄片試料を挿入したときに観測される共振周波数とQ値の変化から誘電体の共振特性変化に対する寄与を求めて、その複素誘電率を算定する方法であり、フェライトのような絶縁物磁性体の複素誘電率を評価する方法としては既に IEC および JIS で規格化されている^{4),5)}。測定法の分類では、材料定数を共振特性から調べる共振器法であり、誘電体を挿入していないときの共振特性が基準となるので『共振器を用いた比較法』のカテゴリーに入る測定法といえる。

摂動法では、共振器内に電界だけが存在する領域や磁界だけが存在する領域があるのに着目して、小さな試料をそれらの領域に挿入して摂動を調べることににより、反射法より格段と精度高く、誘電率と透磁率を分離して測定することもできる。

最近では古典的な摂動法の他に平板試料を円形空洞共

Fig. 6 Cavity resonator for perturbation method.

Fig. 7 Measuring system of perturbation method.

振器 (TE₀₁₁) に挟んで誘電率を評価する方法や、2 個の円板誘電体共振器の間に平板試料を挟んで誘電率を評価する摂動法も提案されており、後者については測定治具も発売されている^{6),7)}。

(1) 小試料を測定する摂動法

最も一般的な摂動法としては、Fig. 6 に示すような共振器に小さな棒状試料を挿入して Fig. 7 に示すような測定系により測定する。共振器の形態としては、1 GHz 以下の周波数では同軸共振器を使用して小型化を図り、1 GHz 以上では Q 値を高くするために空洞共振器を使用する。摂動法による複素誘電率は次のような手順で求められる。

- 試料を挿入していない共振器の共振周波数 (f_0) と Q 値 (Q_0) を測定する。
- 空洞共振器に試料を挿入して共振周波数 (f_s) と Q 値 (Q_s) を測定する。
- これらの測定データと試料の容積 (δv)、共振器の容積 (V) を決められた公式に代入して複素誘電率を算出する。

JIS で規定されている公式では計算精度を改善するために多くの補正項を取り込んで複雑なので、ここでは物理的に見通しの良いオリジナルの公式をあげておく。

$$\epsilon' = 1 + (V / \alpha \delta v) (f_s / f_0 - 1) \quad (4)$$

$$\epsilon'' = (V / 2 \alpha \delta v) (1 / Q_s - 1 / Q_0) \quad (5)$$

α は共振器のモードにより決まる定数で、

Vol. 8, No. 1

矩形導波管 TE₀₁ では 2.000

円形導波管 TM₀₁ では 1.855 を用いる。

これまで、摂動法は、

- 摂動の高次項を切り捨てるため高精度が期待できない
- 誘電率の評価精度が空洞共振器の共振周波数と Q 値の測定精度より約 2 桁低くなる
- 評価精度に直接影響する試料の容積測定精度を高めるのが困難

などの問題があり、低損失誘電体を高精度で測定できる誘電体共振器法が広まるにつれて誘電体測定法としてはあまり顧みられなくなっていた。特に、b. 項はアナログ系測定装置を利用する場合には精度改善の余地がほとんど無く、摂動法の測定精度向上を図る上で大きなネックであった。

しかし、最近のデジタル方式測定装置の発展を受けて、面積法により高精度の共振器特性評価が可能になり、さらに等時間間隔法による測定系の時間変動分を消去するデータ処理法を採用すれば、高精度の誘電体評価法にな

Fig. 8 Splitted cavity for perturbation method.

Fig. 9 Dual-disk resonator for perturbation method.

ることが明らかになっている⁹⁾。今後は誘電体の小さな試料を評価する方法として再び広く利用されることになると思われる。

(2) 平板を測定する摂動法

この方法に関しては Fig. 8 に示すように、空洞共振器を二分割して間に平板を挟む構造と、Fig. 9 に示すように 2 枚のセラミックス円盤共振器の間に平板を挟む構造が提案されており、ハイブリッド集積回路に使用する誘電体基板などを非破壊測定するのに適している。摂動法であるから、誘電率算定の公式は先にあげた(4)、(5)式と基本的に同一であり、特に示さないで詳細は各々の資料を参考にしていきたい。

空洞共振器による摂動法の特長は、誘電体基板の複素誘電率温度特性が非破壊で測定できることである。ただし、基板の平面度と平行度を良くして空洞共振器に隙間なく挟み込めないと測定誤差増大の原因になるので注意が必要である。また、基板の大きさが共振器の直径より大きくなければならないので、1 GHz 付近で測定するには直径 25 cm 以上の大きな平板が必要になり、小さな試料を低い周波数で測定するのには適さない。

2 枚のセラミックス円盤共振器の間に平板を挟む形式の測定は、厚さと誘電率がわかっている基板と比較して誘電率を評価する二段階の比較法である。この方法では共振器の直径が小さいため、基板内の誘電率分布も測定可能である。また、共振器同士を接触させる必要はないので、基板の平面度と平行度についての要求はあまり厳しくない。ただし、基板の厚さが標準試料と著しく異なる場合には測定精度が低くなるとされている。

以上をまとめると、摂動法は常温における中程度以下の誘電損 (Q 値 50 以上 5,000 以下) を示す小さな誘電体試料を測定するのに適しており、温度特性や誘電率の分布についても他の測定例との一致が確認できれば充分信頼できる測定法である。

2.3 誘電体共振器法

誘電体共振器法は誘電体共振回路に使用する誘電体開発に伴って確立された方法で、Fig. 10 に示すように、誘電体円柱を駆動して共振器モードを発生させ、その共振周波数と Q 値から複素誘電率を直接求めようとする方法である⁹⁾。測定のカテゴリーとしては『共振により材料定数を求める直接法』に分類される。

この方法は誘電損失が小さい誘電体 (Q 値 5,000 以上) の測定に適しており、誘電率およびその温度特性なども前述した方法より精度良く評価できる。共振器の基本的な構成は Fig. 10 (a) に示してあるような両端短絡共振器であるが、低誘電損失 (高 Q 値) の素材評価では (b) イメージ型共振器および (c) MIC 型共振器などの構造が実用化されている。ここでは先ず基本形である両端短絡法について説明する。

(1) 両端短絡誘電体共振器法

この方法による測定では先の図で示したように、円筒型 (直径 10 mm、高さ 5 mm が標準的寸法) に加工された誘電体を短絡板と呼ばれる 2 枚の金属円板に挟んだ測定用治具に入出力線路を取り付けて共振器を構成する。この共振器を Fig. 7 に示された測定系の空洞共振器に置き換えて支持金属の影響が最も少ない TE_{011} を励起させて共振特性を測定し、共振周波数から誘電率を、 Q 値から誘電損失を求める。誘電体の直径 d 、高さ h 、共振周波数 f_r と ϵ' の関係は(7)式で与えられる。

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{\pi d f_r} \right)^2 (u^2 + v^2) + 1 \quad (7)$$

ただし、

$$v^2 = \left(\frac{\pi d f_r}{c} \right)^2 \left\{ \left(\frac{cl}{2hf_r} \right)^2 - 1 \right\}$$

$$u \frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)}$$

ただし、 J はベッセル関数、 K は変型ベッセル関数

測定データから誘電率 (ϵ') を求める計算プロセスはかなり複雑で、(7)式のような超越方程式を技術的計算用のコンピュータで解かねばならない。

Fig. 10 Resonator structure of resonator method.

誘電損失は共振器の Q 値から得られるが、測定値の中には誘電体を支えている金属の損失が含まれている。この損失項は支持金属の導電率から算定して除去することができる。共振周波数を f_r および Q 値を Q として誘電損失 (ϵ''/ϵ') を求める過程を(8)式に示す。

$$\tan \delta = \frac{A}{Q} - B \cdot R_s$$

$$A = 1 + \frac{W}{\epsilon_r}$$

$$W = \frac{J_1^2(u) \{K_0(v)K_2(v) - K_1^2(v)\}}{K_1^2(v) \{J_1^2(u) - J_0(u)J_2(u)\}}$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_r u}{\sigma}}$$

ただし、 σ は支持金属の導電率

実際に低損失誘電体の測定データを上に示した過程で計算してみると、 TE_{011} モードを選択したのにもかかわらず、支持金属の損失が誘電損失の数倍以上になっていることが多い。したがって、支持金属の損失算定に誤差があると誘電損失は大幅に変動して誤差が増大することになる。この測定法の問題点は、支持金属による損失を実際に確認できないことである。

しかし、原理的に考えれば、誘電体共振器法は誘電体評価法の中で最も精度良く誘電損失を測定できる方法なので、実際の測定データをもとにして支持金属の損失を除去し誘電損失の算定精度を改善する方法が探索された。金属の損失を正確に求める方法として、 TE_{011} の他に同一治具内に同寸法の誘電体を3段積みにして同一周波数で共振する TE_{013} モードを励起させ、双方の Q 値を差し引くことにより支持金属の損失項を除去する方法が提案された⁹⁾。現在ではこの方法により精度の良い測定が可能になっている。これらの詳細については参考資料を参照してほしい。

このような経緯を経て両端短絡誘電体共振器法は低損失・低温度係数の誘電体評価法としてほとんど確立されており、誘電体評価法の標準になるといえる。ただし、この方法では支持金属の損失が測定結果の大部分を占めているため、 Q 値が 10^4 を超えるような材質においては測定誤差が10%以上にもなる例があり、支持金属の影響が少ない測定法を確立することが望まれている。

次に紹介する方法は、このような観点から両端短絡共振器法の問題点を解消するものと考えられているが、まだ原理的な問題点が残っている。

(2) MIC 型共振器法

誘電体共振器の $TE_{01\theta}$ モードを使用する測定法で、Fig.10 c に示してあるように金属で支持する必要がなく、測定 Q 値から負荷の影響を除けば誘電損失が求めら

Vol.8, No.1

Fig.11 Lorentz type resonance curve.

れるので高精度の測定が期待できる¹⁰⁾。しかし、実用化されている測定治具を用いて両端短絡法のデータと比較してみると、誘電率、誘電損失とも MIC 共振器法が大きな値を示す場合もあることが報告されている。

空中に保持された誘電体円板の共振周波数と寸法の関係を解析的に求めることはできないことが知られている。誘電体円板の共振周波数から誘電率を求めるために変分法や有限要素法に基づく近似法が提案され、両端短絡法の解と良く一致することが確認されている。しかし、このプログラムを実行するには大型コンピュータが必要で、簡略的な方法では必要な精度が確保できないのが誘電率が解不一致になる大きな理由のようである。

誘電損失が両端短絡法の結果と一致しない理由についてはまだ解明されていない。ただ、空洞共振器の Q 値測定結果などから判断すると、結合ループによって駆動されている共振器の Q 値を共振曲線の半値幅から求めるのは妥当でないとの結果が得られており、これらの問題と関連つけて解明する必要があると考えられるので、MIC 型共振器法について一層のリファインが待たれる。

2.4 共振器特性測定法

共振現象を利用して誘電体の材料定数が精度良く求められることを説明してきた。これらの説明から、高精度の誘電体評価は高精度の共振器性能評価に帰着されることがわかっていただけたと思う。そこで共振器の Q 値をいかにして正確に求めるかという問題を簡単に検討してみたい。

共振器内の電磁エネルギーを周波数の関数として表現

すると Fig.11 のようになり、共振回路が単一の場合にはローレンツ型曲線と称する形になる。共振曲線（周波数選択性）の鋭さを示す指数として Q 値が次のように定義されており、共振曲線がローレンツ型の場合には Q 値は共振周波数と図中に示した半値幅との比に一致する。

しかし、空洞共振器などで実際に調べてみると共振曲線はローレンツ型から外れており、駆動ループのインダクタンスが一体となって複数の共振器を構成しているのが外れの原因と考えられている。このような共振回路では半値幅は Q 値を示す指標にならず、共振器の損失から直接 Q 値を求めねばならない。波動力学的考察から、共振回路の損失が共振曲線の周波数領域における面積に対応することを当てはめて、半値幅を周波数領域における共振曲線の面積に置換する方法がある¹¹⁾。デジタル方式の測定装置を利用すれば、面積法は従来の半値幅法の $1/2$ 以下の誤差で共振性能を測定できることが確認されている¹²⁾。このような新しいアプローチによって共振に関する基本問題や誘電体の損失機構についてさらに深い理解が得られることが期待される。

3. おわりに

高周波用セラミックス誘電体材料の測定法のタイトルで小文をまとめようと試みた。素材の進歩に応じて評価法がリファインされてゆく過程も理解していただけたと

思う。低損失誘電体の評価についてはまだ確定的な測定法が決定されていないが、これも材料の進歩に伴う評価法進歩の一コマと理解していただきたい。このような過程を経て、従来決着がついていると考えられていた Q 値の定義のような問題に新しい局面が表れたのも素材の進歩によるものといえる。この小文を通して材料評価にまつわる周辺技術進歩の跡を併せて理解していただければ幸いです。

参 考 資 料

- 1) A.von Hippel, Dielectrics and Waves (John Wiley, 1954)
- 2) Hewlett Packard 社製, Dielectric Probe Kit, HP 85070 A
- 3) 関東電子応用開発製, サンプルホルダーキット, CSH 1/WSH 1
- 4) IEC Pub.556 (1982)
- 5) JIS C 2565, マイクロ波用フェライト磁心試験方法
- 6) 小林, 加屋野, 他: 信学技報, MW 91-75 (1991)
- 7) 村田製作所製, DRG 8820
- 8) 三浦, 古林, 他: 信学技報, MW 91-97 (1991)
- 9) Y.Kobayashi et al.: IEEE Trans MTT MTT-33, 7, 586 (1985)
- 10) 村田製作所製, DRG 8553
- 11) 柳井, 雄城: 信学誌, **36** [3], 121-125 (1953)
- 12) 三浦, 古林, 他: 信学技報, MW 91-16 (1991)