

単一の製法で製作した試料による 基板材料の誘電体損失と導体損失の測定

石飛 徳昌[†]

[†] 有限会社ソネット技研 〒285-0858 千葉県佐倉市ユーカリが丘 5-1-1-706

E-mail: [†] tovy@ieee.org

あらまし ガラスエポキシ基板の導体損失と誘電体損失を測定した。まず電磁界解析に基づいて、線路幅と導体導電率と基板材料の誘電正接と線路損失の関係をあらわす近似式を導く。次に基板材料に線路幅の異なる2種類の半波長共振器をつくり、それぞれの共振Q、そして線路損失を測定する。そして、二つの測定結果を上記近似式に与えて、導体導電率と基板材料の誘電正接を未知数とする連立方程式を得る。

キーワード 基板, 導体損失, 誘電体損失, 導電率, 誘電正接, 測定, 近似式, 電磁界解析

The measurement of dielectric and conductive losses of the substrate with samples by single fabrication process

Norimasa ISHITOBI[†]

[†] Sonnet Giken Co.,Ltd. 5-1-1-706 Eucary, Sakura-city 285-0858 Japan

E-mail: [†] tovy@ieee.org

Abstract This paper shows that measurement of dielectric loss and conductive loss of Glass-Epoxy substrate. First, the approximate equation which shows the relationship between Q-factor, line width, conductivity and dielectric loss tangent, will be determined by electromagnetic simulation. Next, two samples which has different line width will be fabricated and evaluated. Finally, the conductivity and the dielectric loss tangent will be calculated, by putting evaluated value into the approximate equation.

Keyword Substrate, conductive loss, dielectric loss, tangent, measurement, approximate equation, electromagnetic simulation

1. 背景^{[1][2][3]}

多層セラミック基板や樹脂ビルドアップ基板など高速高周波回路の高密度実装を目的とした新工法やプロセスの開発が盛んに行われているが、その過程で線路の高周波損失の評価が必要とされることは言うまでも無い。線路損失は誘電体に起因する損失と導体に起因する損失に分けられるが、実際の線路を試料として評価する場合の測定値は二つの損失の合計であり、その損失の要因を知ることはできない。そこで誘電体損失を測定するために誘電体だけを取り出して試料を測定し、また導体損失を測定するためには専用の試料を測定するか、あるいは全体の損失から誘電体損失を差し引いて導体損失を推測していた。

ところが、材料の製造成形プロセスでは工法が異なれば、たとえその材料成分が同じでも電気的物性は異なることがある。例えばセラミック材料の評価に多く用いられる円筒型の共振器は金型プレスを使って加圧成形されるが、その材料を使って平面基板を製造する場合にはまったく違った工法が使われるので、完成後の誘電体の密度や粒子の分布などは異なったものにな

る。あるいは導体材料に関しても圧延導体と薄膜導体、さらには金属粉末を印刷した導体では、その断面形状、粒度分布や粒界、誘電体との界面の状態がそれぞれ異なる(図1)。従って、線路損失の評価には実際の線路を試料として測定することが望ましい。

また、量産時の品質管理の一環として基板の電気的性能を継続的に監視しようとする、評価用試料は量産プロセスと同時に製造できなくてはならない。

そこで本報告では、回路基板の最終的な製品と同じプロセスを使って試料を製造し、しかも誘電体損失と導体損失を分離して知ることができる測定方法を提案する。そして一例としてガラスエポキシ基板の2GHzでの導体損失と誘電体損失を測定した。

2. 方法^[4]

2.1. 現実の線路損失

マイクロストリップ線路の損失は、導体損失 α_c と誘電体損失 α_d の和で、それぞれは構造寸法や材料定数な

どの関数である。例えば

$$\alpha = \alpha_c(h, w, \varepsilon_r, t, \text{freq}, \sigma) + \alpha_d(h, w, \varepsilon_r, t, \text{freq}, \tan \delta) \quad (1)$$

この関数については、様々な研究が行われている。しかし日々、新たな材料、工法が開発され、それに伴って次々に出現する新しい微細構造の影響を完全に適用できる関数は無い。

そこでここでは、それらの様々なパラメータの影響を含めて等価導電率 σ_{eff} 、等価誘電体損失 $\tan \delta_{eff}$ とし、損失近似式を仮定する。

2.2. 損失近似式

ここで提案する評価法では線路幅 w に着目して、他のパラメータが同一で、線路幅だけが w_1, w_2 なる2種類の試料を試作評価する。とすると(1)式の引数は $w, \sigma_{eff}, \tan \delta_{eff}$ のみとなるので

$$\alpha = \alpha_c(w, \sigma_{eff}) + \alpha_d(w, \tan \delta_{eff}) \quad (2)$$

ここに、

$$\alpha_c \propto \frac{1}{\sqrt{\sigma_{eff}}}$$

$$\alpha_d \propto \tan \delta_{eff}$$

なので、損失近似式を例えば

$$\alpha_c(w, \sigma_{eff}) = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{eff}}} \cdot (k_{c1}/w + k_{c2}) \quad (3)$$

$$\alpha_d(w, \tan \delta_{eff}) = \tan \delta_{eff} \cdot k_{d1} \cdot (k_{d2} \cdot w + 1)$$

と仮定し、それらの係数 $k_{c1}, k_{c2}, k_{d1}, k_{d2}$ を求める。

2.3. 電磁界解析¹⁶⁾

下表に従って4種類のパラメータを与えたモデルを電磁界解析して α_c, α_d を求める。但し当初は $\sigma_{eff}, \tan \delta_{eff}$ は未知なので、 $\sigma_i, \tan \delta_i$ には適当な初期値 $\sigma_1, \tan \delta_1$ を与える。

モデル番号	線路幅 w	導電率 σ	誘電体損失 $\tan \delta$	伝送損失 α
C1	w_1	σ_i	0	α_{c1}
D1		∞	$\tan \delta_i$	α_{d1}
C2	w_2	σ_i	0	α_{c2}
D2		∞	$\tan \delta_i$	α_{d2}

2.4. 導体損失近似式の導出

電磁界解析のモデル番号 C1, C2 の結果を(3)式に代入して下記の連立方程式を得る。

$$\begin{cases} \alpha_{c1} = \frac{1}{\sqrt{\sigma_i}} \cdot (k_{c1}/w_1 + k_{c2}) \\ \alpha_{c2} = \frac{1}{\sqrt{\sigma_i}} \cdot (k_{c1}/w_2 + k_{c2}) \end{cases} \quad (4)$$

これを k_{c1}, k_{c2} に関して解くと

$$\begin{cases} k_{c1} = \sqrt{\sigma_i} \cdot \frac{\alpha_{c1} - \alpha_{c2}}{(1/w_1 + 1/w_2)} \\ k_{c2} = \sqrt{\sigma_i} \alpha_{c1} - \frac{k_{c1}}{w_1} \end{cases} \quad (5)$$

を得る。この係数 k_{c1}, k_{c2} は仮定値 σ_i の周りで正しい。

2.5. 誘電体損失近似式

電磁界解析のモデル番号 D1, D2 の結果を(3)式に代入して下記の連立方程式を得る。

$$\begin{cases} \alpha_{d1} = \tan \delta_i \cdot k_{d1} \cdot (k_{d2} \cdot w_1 + 1) \\ \alpha_{d2} = \tan \delta_i \cdot k_{d1} \cdot (k_{d2} \cdot w_2 + 1) \end{cases} \quad (6)$$

これを k_{d1}, k_{d2} に関して解くと

$$\begin{cases} k_{d1} = \frac{\alpha_{d1}}{\tan \delta_i \cdot (k_{d2} \cdot w_1 + 1)} \\ k_{d2} = \frac{\alpha_{d2} - \alpha_{d1}}{\alpha_{d1} \cdot w_2 - \alpha_{d2} \cdot w_1} \end{cases} \quad (7)$$

を得る。この係数 k_{d1}, k_{d2} は仮定値 $\tan \delta_i$ の周りで正しい。

2.6. 測定

二つの線路幅 w_1, w_2 の試料を製作し、その線路損失 α_1, α_2 を測定し、これを(3),(5),(7)式に代入して次の連立方程式を得る。

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{k_{c1}/w_1 + k_{c2}}{\sqrt{\sigma_{i+1}}} + \tan \delta_{i+1} \cdot k_{d1} \cdot (k_{d2} \cdot w_1 + 1) \\ \alpha_2 = \frac{k_{c1}/w_2 + k_{c2}}{\sqrt{\sigma_{i+1}}} + \tan \delta_{i+1} \cdot k_{d1} \cdot (k_{d2} \cdot w_2 + 1) \end{cases} \quad (8)$$

これを $\sigma_{i+1} \tan \delta_{i+1}$ に関して解くと

$$\begin{cases} \sqrt{\sigma_{i+1}} = \frac{KD2 \cdot KC1 - KD1 \cdot KC2}{KD2 \cdot \alpha_1 - KD1 \cdot \alpha_2} \\ \tan \delta_{i+1} = \frac{\alpha_1}{KD1} - \frac{1}{\sqrt{\sigma_i}} \cdot \frac{KC1}{KD1} \end{cases} \quad (9)$$

を得る。但しここに、

$$\begin{aligned} KC1 &= k_{c1}/w_1 + k_{c2} \\ KD1 &= k_{d1} \cdot (k_{d2} \cdot w_1 + 1) \\ KC2 &= k_{c1}/w_2 + k_{c2} \\ KD2 &= k_{d1} \cdot (k_{d2} \cdot w_2 + 1) \end{aligned} \quad (10)$$

である。

2.7. 修正

(9)式の $\sigma_{i+1}, \tan \delta_{i+1}$ は、適当に仮定した初期値 $\sigma_i, \tan \delta_i$ に基づいている。故に(9)式で求めた $\sigma_{i+1}, \tan \delta_{i+1}$ を再び電磁界解析モデル C1,C2,D1,D2 に与えて $\sigma_{i+2}, \tan \delta_{i+2}$ を求める操作を繰り返す。そして N 回目の結果と N-1 回目の結果を比較して $\frac{\sigma_N - \sigma_{N-1}}{\sigma_N}, \frac{\tan \delta_N - \tan \delta_{N-1}}{\tan \delta_N}$ がそれぞれ十分小さければ $\sigma_{eff} \approx \sigma_N, \tan \delta_{eff} \approx \tan \delta_N$ と見なしうる。

3. 実験

ここではもっとも一般的な 1.6mm FR4 基板の 2GHz 付近の損失を前述の方法で評価した。

3.1. 最適なサンプル線路幅についての検討

上述の評価方法に必要な試料の二種類の線路幅について検討する。この評価方法では導体損失と誘電体損失のどちらか一方が支配的な領域では、非支配的な損失成分の誤差が大きくなる。また線路幅によって損失が変化しない二種類の線路幅を選択した場合も誤差が大きくなる。それ故、損失の線路幅依存性が強く、しかも導体損失と誘電体損失が拮抗する線路幅領域から二種類の線路幅を選択するのが良い。

図 2 は、1.6mm FR4 基板の 2GHz での損失について電磁界解析した結果である。但し、導電率は銅の導電率 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ 、誘電体損失は 1MHz での

$\tan \delta = 0.02$ を使用した。

線路幅が狭い領域では損失の線路幅依存性は比較的強くなり、また導体損失が誘電体損失に比べて無視しえなくなっていることがわかる。さらに製造上の精度も勘案し、この実験では線路幅 0.2(mm)と 0.5(mm)の試料を評価することにする。

3.2. 測定^[5]

ここでは測定の容易さから線路損失 α でなく、両端開放 $\lambda/2$ 共振器の共振周波数と半値幅を測定し、そこから $Q_u, \epsilon_{r(eff)}$ を、そして $\gamma = \alpha + j\beta$ を求めた。下表は実際の測定値、そして図 3 にサンプルの概観を、図 4 に共振曲線の一例を示す。

サンプル	線路幅 w(mm)	Qu	線路損失 α (db/m)
1	w ₁ =0.2	36.0	$\alpha_1=8.52$
2	w ₂ =0.5	44.6	$\alpha_2=6.97$

3.3. 初期値と収束の様子

初期値として $\sigma_1 = 5.8 \times 10^7, \tan \delta_1 = 0.02$ を仮定して(1)~(7)式を計算し、測定値を(8)~(10)式に与えて $\sigma_2, \tan \delta_2$ を得た。この操作を繰り返して、収束値は $\sigma_{eff} = 1.83 \times 10^6, \tan \delta_{eff} = 0.0148$ となった。図 5 は $\sigma_N, \tan \delta_N$ が、 $\sigma_{eff}, \tan \delta_{eff}$ に収束してゆく様子を示す。

3.4. 測定結果

収束した $\sigma_{eff}, \tan \delta_{eff}$ の値に基づいて、再び線路損失の線路幅依存性を電磁界解析から求めた結果を図 6 に示す。図 2 と比較すると、当初の仮定よりも導体損失が大きく、誘電体損失が小さいことがわかる。そのため線路損失の導体幅依存性も当初の仮定よりも大きい。

4. むすび

回路基板の最終製品と同じプロセスを使って試料を製造し、誘電体損失と導体損失を分離して評価する方法を提案した。そして一例として FR4 基板の 2GHz での導体損失と誘電体損失を測定し、当初予測より導体損失が大きいことを確かめた。

5. 今後の課題

近年低コストの配線プロセスとして金属粉末の印刷法に注目されているが、その高周波損失について、今回提案の方法を適用してみたい。また(3)式について

より綿密な近似式を使った場合の優劣についても研究してみたい。

文 献

- [1] 小林 禧夫:「低損失誘電体および高温超電導体のミリ波評価法の開発動向」, 電学論 C, 124-2(2004), pp264-268
- [2] H.Shimoda, N.Ishitobi, K.Kawamura “Development of a High-Q Multilayer Ceramic Resonator,” J. Appl. Phys. 31 (1992), pp.3160-3163
- [3] Jae hyuk Jang, N.Ishitobi “Modeling of real-Shaped LTCC Stripline Structure having Sharpened Edges and Embedded Pores,” 2002 IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Dig., PP.673-676
- [4] Pucel,R.A.,et al., “Losses in Microstrip,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-16 (1968), pp. 342-350
- [5] American Society for Testing Materials “Standard Test Method for Relative Permittivity (Dielectric Constant) and Dissipation Factor of Polymer-Based Microwave Circuit Substrates,” D-3380-90
- [6] Sonnet em softawre package, Syracuse, NY

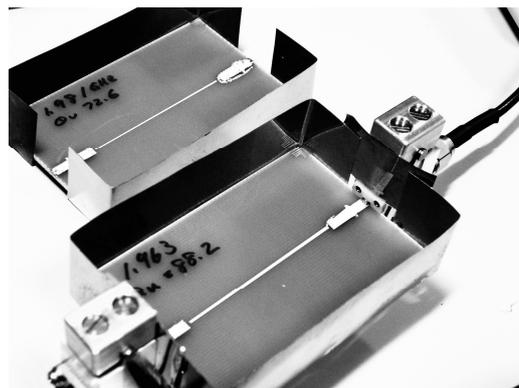


図 3 試作した評価サンプルの外観

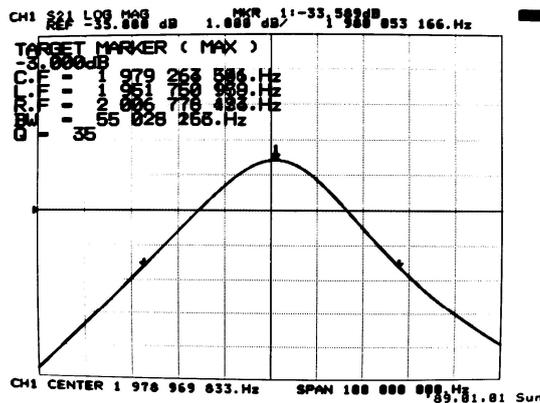


図 4 試作した評価サンプルの共振曲線の一部

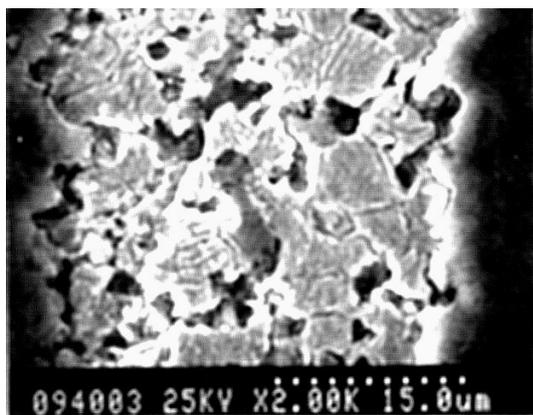


図 1 低温焼成セラミック基板の導体の断面構造の一例

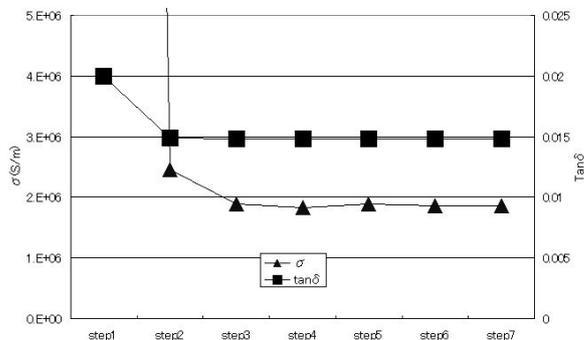


図 5 導電率と誘電体損失の収束の様子

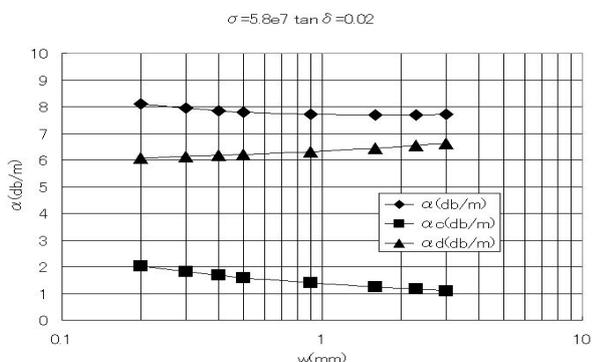


図 2 FR-4 線路損失の線路幅依存性の電磁界解析結果 (導電率、誘電体損失は仮定値)

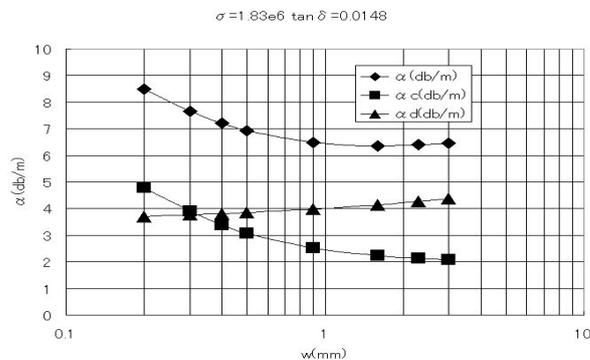


図 6 線路損失の線路幅依存性の電磁界解析結果 (導電率、誘電体損失は収束値)