

# 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  
(有)ソネット技研  
[Tovy@ieee.org](mailto:Tovy@ieee.org)

みなさまこんにちは

ソネット技研いしとびでございます。

メーカーを離れて、シミュレータの販売を始めて5年以上たちました。

その5年間、やらないやらないやと思いつつサボってきたことをようやくまとめたので  
ほんとうに久しぶりに研究会にやってきました。

タイトルは

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  
です。

話の本題はとても単純なので、背景を少し長く、そして議論の時間に余裕を残したいと  
思います。

# 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

## • 背景と目標

- ガラスエポキシ基板の導体粗さ
- 導体印刷法の導体の微細構造
- 多層セラミック工法の導体の微細構造

## • 方法

## • 実験

## • むすびと今後の課題

背景と目標と書いてあります。

目標を先に言うと、荒れた導体でできたストリップ線路の損失を楽チンに評価したいということです。

それをしなきゃならなくなった背景を三つあげました。

第一は、5月に 超高速高周波エレクトロニクス実装研究会で、小林先生から ガラエポ基板の表面粗さが導体損失に少なからぬ影響を与えているとご指摘を受けたこと。

それまで私はガラエポ基板の場合は 光り輝くつるつるの圧延銅だから 表面粗さを気にする必要は無いと 盲目的に信じていたのです。

信じて 理科年表の銅の導電率をそのまま使ってシミュレーションして、測定してまあ、そう致命的なことにはならない範囲でやってきました。

そこに 小林先生からご指摘いただいて あっと思いました。ガラエポでもだめなんだ、と

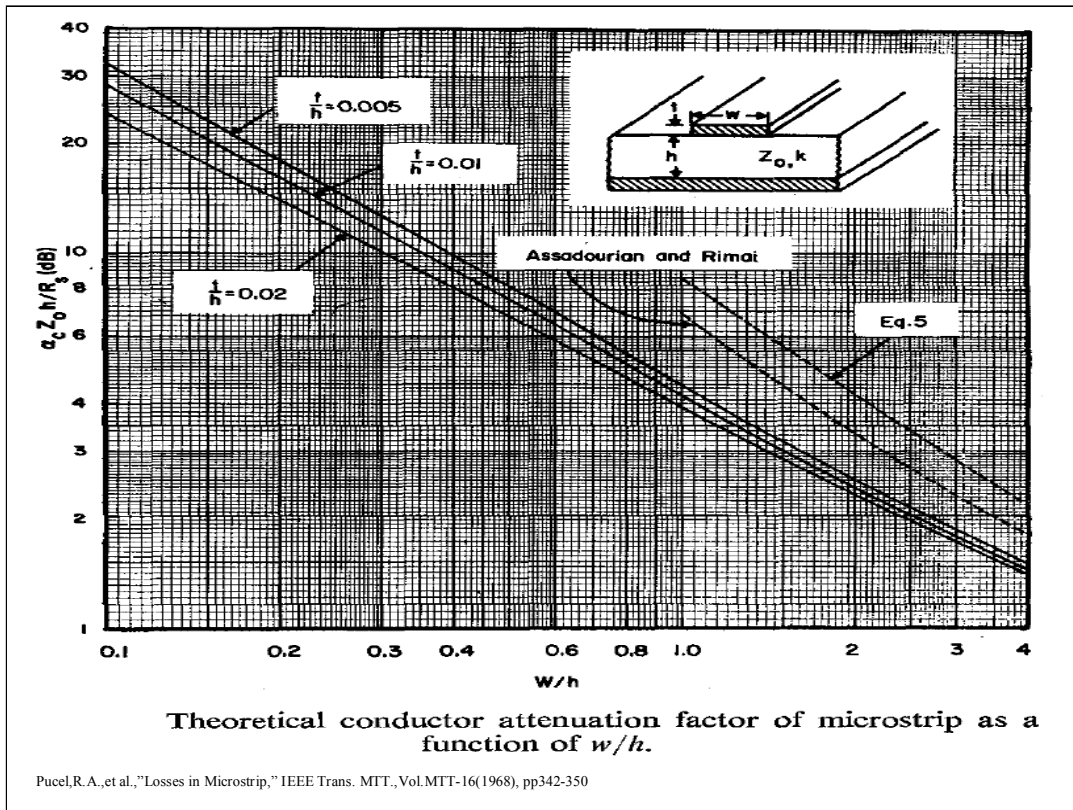
第二は、ガラエポじゃない場合です。

シミュレータ売りの仕事をしていてマイクロ波以外の人たちの仕事を見る機会があります。その中で、もう、金属パウダーで導体を印刷して回路を形成するという工法が、すでに当たり前の方法として認知されつつある。その場合もう、導体の微細構造というのはつぶつぶのぼろぼろであろうことは容易に想像がつきます。それを高周波回路やアンテナに使うという相談をしょっちゅう受けています。で、私は 高周波ではまずいよ とあちこちで話しているんですが、具体的にどのくらい悪いとか、どうやってその悪さを調べるかということをちゃんと調べてませんでした。

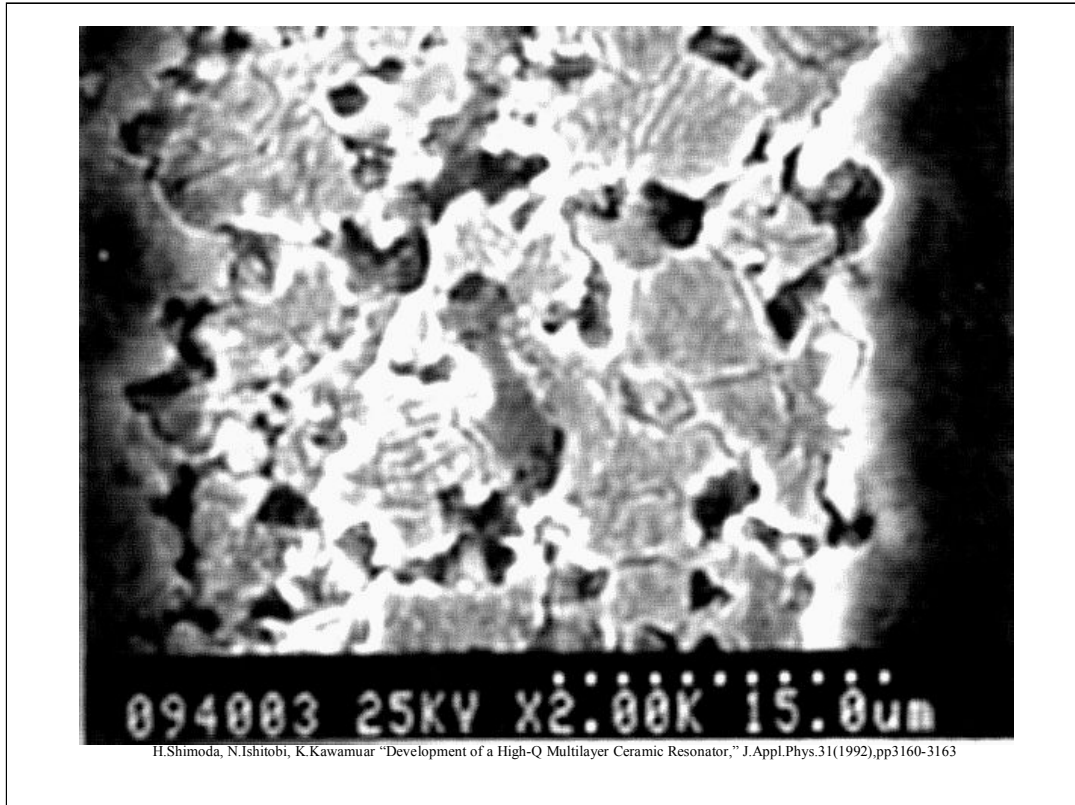
こちらはガラエポの荒さよりずっと荒く、致命的な現象が起こりそうです。しかも向う5年くらいの間に高周波と関係ない人々がぞくぞくとやってしまいそうです。

第三は、

冒頭に申し上げた過去五年気になったことです。これについて詳しくお話ししましょう。



マイクロストリップの断面がこんな風に縦横水平垂直の線でできていて表面がつるつるなら線路損失を知ることは簡単なはずですが、



実態はこんな感じです。

この写真だと導体の厚さは10-20umオーダーで

表面の凹凸は3-5umのオーダー、

さらにくぼみは深く洞窟のように導体の深い部分まで空間があります。

これは特にひどい例、、、ならいいんですが、

低温焼成多層セラミック いわゆるLTCC基板の内部導体としては

まあまあ ありふれた写真です。

いやもちろんもっときれいに緻密な導体ができることもあります。

量産のときは常にもっときれいに緻密な導体がいっぱい詰まった製品ができなきゃいけないです。

でも、たまに 生産量を上げたくてたくさんの基板を一気に炉にいれたり、

炉の隅っこまでいっぱいにおいて焼こうとしたり、

たまたま冷却水の経路を変えたり、、、

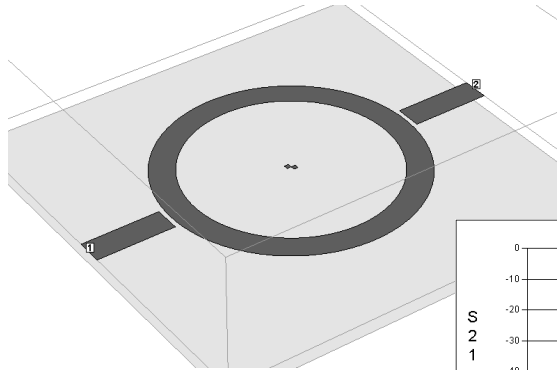
ちょっとしたことでこんな胴体ができる可能性があるんで、監視しておきたい。

まして材料開発の思索段階ではもう、、もっとひどい導体じゃんじゃんできてきます。

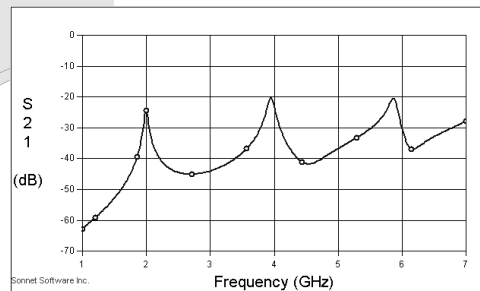
ひどい導体かどうかを確認するために、こうしてSEM写真をとるのも大きいですから当然電氣的な評価をしたいところです。

で、どうやるかという

## 平板誘電体上のTEM モード共振器を測定

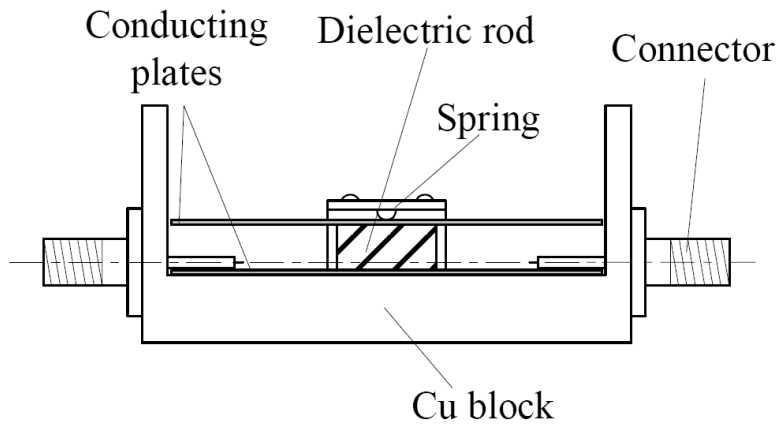


- 全体の損失から誘電体損失を差し引いて導体損失を求める
- $1/Q_c = 1/Q_o - 1/Q_d$



これです、見てのとおりリング共振器を作ってその共振 $Q_o$ を図るわけですが、これだけでは導体が悪いか、どうかはわかりません  
誘電体自体の $tand$ が悪いかもしれない  
材料開発の段階ではそれもざらにあることです。  
だから材料は材料で別に $Q_d$ を図って、  
このリング共振器の $Q_o$ から 別に図った $Q_d$ を差し引いて 導体の $Q_c$ を知る。  
というのがよくやるやり方です。  
じゃあ、その $Q_d$ をどうやって図るかというと、

## 円柱試料で誘電体材料の 複素比誘電率を測定



誘電体円柱の複素比誘電率測定に用いる  
誘電体円柱共振器の構造

小林謙夫「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」  
IEEJ Trans. EIS, Vol.124, No.2, 2004, Pp264-268

セラミックを円柱形に整形したものを別途用意して  
そのQを図るのです。  
この測定法自体は実に精密な方法です。  
ところが

## 問題点

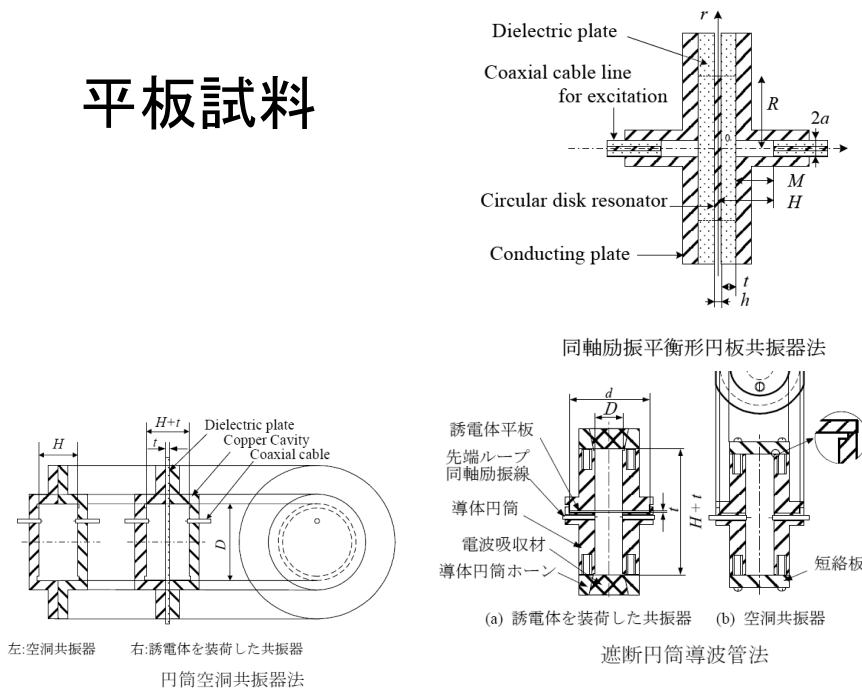
- 誘電体の整形プロセスによって誘電体損失が変わる

円柱形のセラミック試料の整形、焼成のプロセスと  
多層基板のように平べったい形を作るときの整形焼成のプロセスは違います。

プロセスが変われば  
セラミックの粒度分布やら密度やらさらにその分布や違法性が微妙にかわってきます。

できれば、円柱形じゃなくて平べったい板で計りたいです。

# 平板試料



小林謙夫「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」  
IEEJ Trans. EIS, Vol.124, No.2, 2004, Pp264-268

もちろん平板の測定法もあるわけですし、またそれらの測定法の緻密なことは言うまでもないんですが、

にもかかわらず材料開発の現場ではあまり使われていません。

なぜなら、かなしいかな 薄いセラミックの板を、ごつい金属キャビティではさんで締め付けると割れるからです。

それに平板に対して電界が垂直なモードで測定しなければ異方性も心配です。

いやそもそも

目的はTEM線路の導体損失を図りたいのに

さしひくための誘電体損失をそんなに苦労して測定するのはいやです。

実際に回路を思索したり量産するときに、基板の脇にちょっとだけテストパターンのように試料を作って

その試料で導体損失を把握して、量産時にも監視したいものです。

まとめると



## 目標

- 誘電体損失と導体損失を評価する方法
  - 導体損失と誘電体損失を同じ試料から測りたい
  - 実製品と同じ製造プロセスで試料を作りたい
  - 実製品と同じモードで試料を測りたい

単一の製法または試料、導体損失と誘電体損失をひとつの試料、あるいはひとつの製法で作れること。

試料の製法プロセスは、実製品と同じつまりストリップなりマイクロストリップなりで測定するときの共振モードも実製品と同じTEMなこと

そんな測定法がほしい。とこの10年くらい思っていました。

で、きつこうすればできそうと思ったのが5年ほど前。

## 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

### • 背景と目標

- ガラスエポキシ基板の導体粗さ
- 導体印刷法の導体の微細構造
- 多層セラミック工法の導体の微細構造
  - よくある方法
    - TEM共振器で損失を測り、
    - 円柱共振器で誘電体損失を測り
    - 差し引いてTEM線路の導体損失を求めている
  - 目標
    - 導体損失と誘電体損失を同じ試料から測りたい
    - 実製品と同じ製造プロセス
    - 実製品と同じモード

### • 方法

### • 実験

### • むすびと今後の課題

これが3番目の背景です。

古い過去の仕事と、  
これからの心配と  
小林先生らのご指摘をきっかけに

この仕事を始めました。

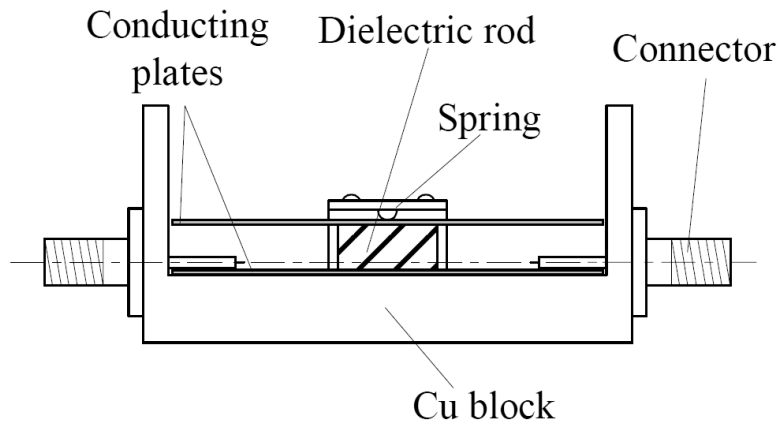
でそれをどう実現するかを考えました

## 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

- 背景と目標
- 方法
  - 円柱共振器の場合
  - 線路幅の違うストリップ線路共振器
- 実験
- むすびと今後の課題

まずは 円柱共振器の場合を振り返ります。  
そしてその類推から今回の方法を紹介します。

## 円柱共振器の場合



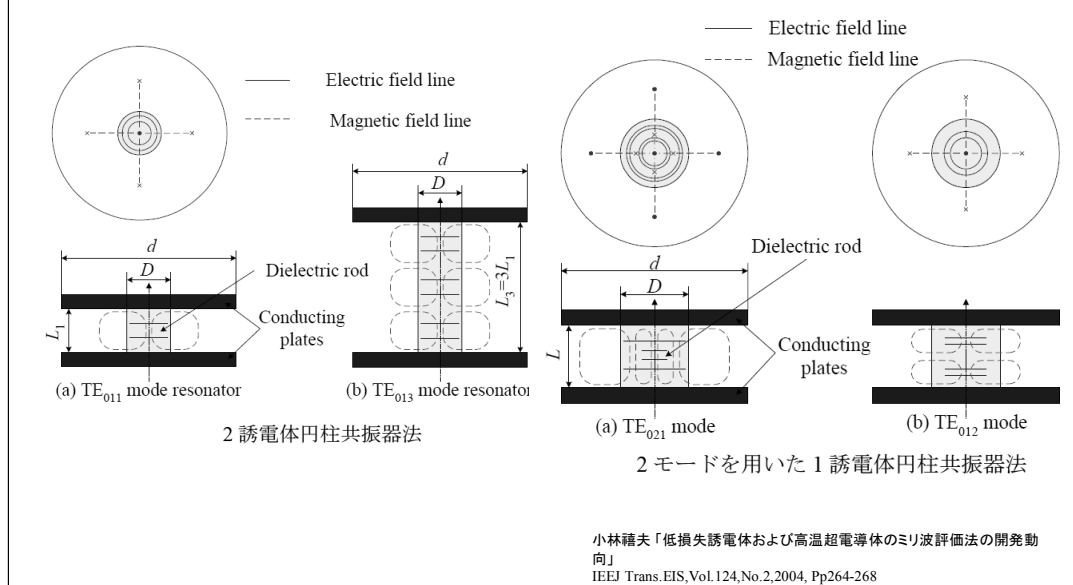
誘電体円柱の複素比誘電率測定に用いる  
誘電体円柱共振器の構造

小林謙夫「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」  
IEEJ Trans. EIS, Vol.124, No.2, 2004, Pp264-268

誘電体円柱で複素比誘電率を測定する場合にも導体損失の影響が問題になることが  
ありました。

その対策として二つの方法が考案されていました

## 円柱共振器の場合



左は 高さだけが違ってそれ以外は全て同一のパラメータで二つの共振器を用意し  
二つのQから導体損失を取り出す方法

しかし、高さ以外のパラメータがまったく同じ試料を二つ作るのは意外にむつかしいものです。

そこで

右の共振器はひとつでありながら二つの共振モードのQから導体損失を取り出す方法  
が考案されました。

## 線路幅の違うストリップ線路共振器

- 例えば
  - 線路幅の違う二つの共振器
  
- 例えば
  - 単一の共振器のEvenモードとOddモード

これらふたつをTEM共振器の場合に適用しようとする

例えば線路幅の違う二つの共振器を用意するか

あるいは たとえば 差動線路で共振器を作って、oddモードとevenモードなり common

モードとdifferentialモードなり

二つのモードを評価する

という方法がありそうです。

幸いマイクロストリップ線路なら線路幅以外のパラメータを全てそろえた試料を作るのは容易ですから、

今回はとりあえず、前者の方法を試してみました。

## 線路幅の違うストリップ線路共振器

$$\alpha = \alpha_c(h, w, \varepsilon_r, t, freq, \sigma) + \alpha_d(h, w, \varepsilon_r, t, freq, \tan \delta)$$

ここまで背景をお話すれば、内容は大方検討がつくと思います。

TEM線路の損失 $\alpha$ が、導体損失 $\alpha_c$ と誘電体損失 $\alpha_d$ からなるとします。

導体損失と誘電体損失はそれぞれ、 $h, w, \varepsilon_r, t, freq, \sigma, \tan \delta$ などなどのパラメータの関数ですが、

## 線路幅の違うストリップ線路共振器

$$\alpha = \alpha_c(h, w, \varepsilon_r, t, freq, \sigma) + \alpha_d(h, w, \varepsilon_r, t, freq, \tan \delta)$$

線路幅 $w$ のみが異なる二つの線路の損失 $\alpha$   
を測定し連立方程式を解く

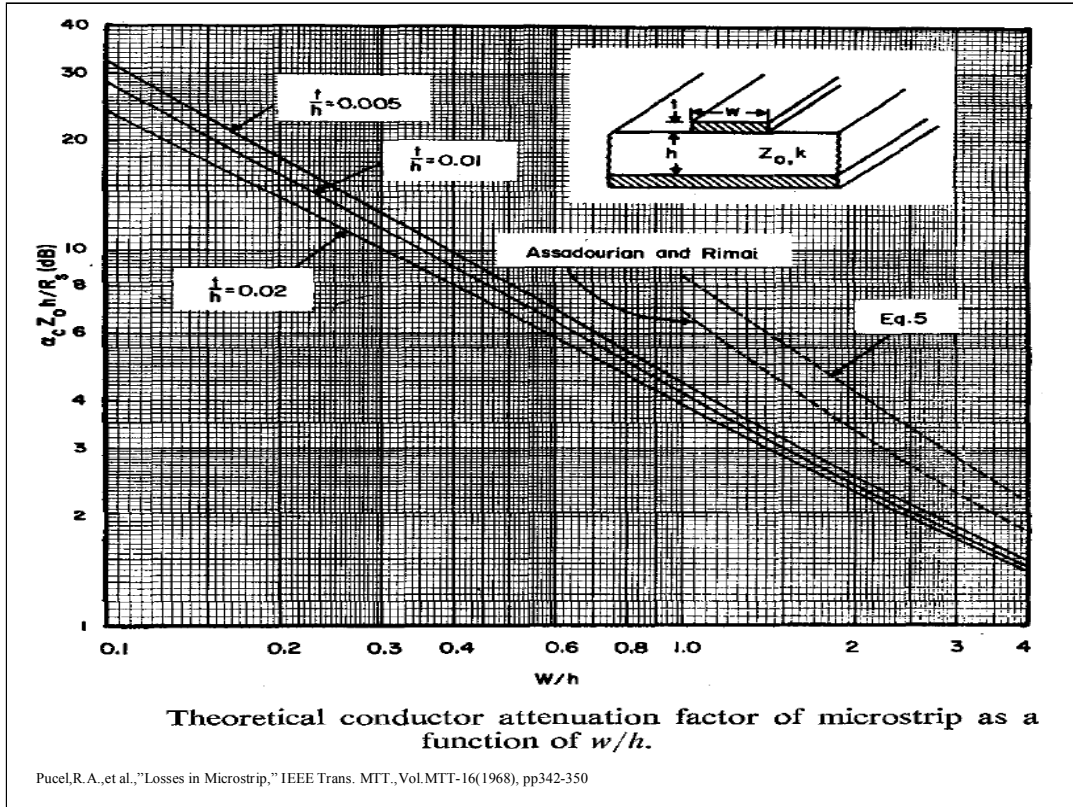
$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_c(w_1, \sigma) + \alpha_d(w_1, \tan \delta) \\ \alpha_2 = \alpha_c(w_2, \sigma) + \alpha_d(w_2, \tan \delta) \end{cases}$$

それらのパラメータを全て同一で線路幅だけが  
 $w_1, w_2$ なる二つの試料を作って それぞれの損失 $\alpha_1, \alpha_2$ を測定します。

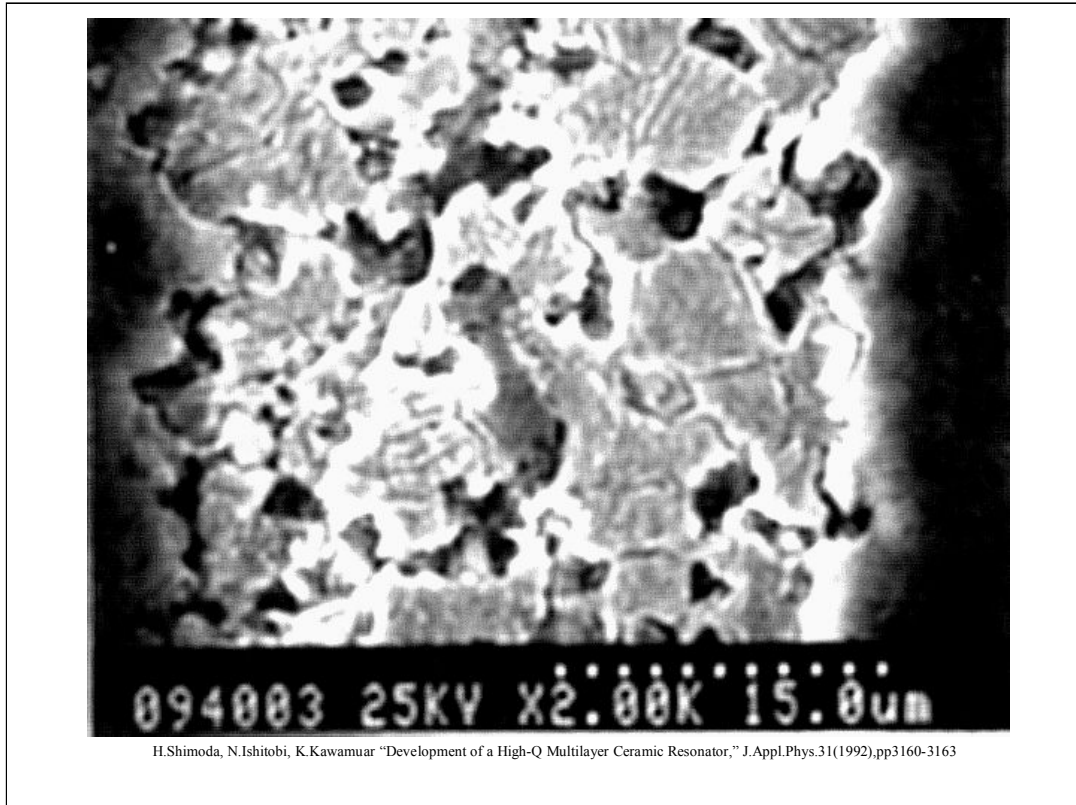
同一のパラメータを省略して書くと、  
線路幅 $w_1$ のとき 損失 $\alpha_1$   
線路幅 $w_2$ のとき 損失 $\alpha_2$   
ここで導電率 $\sigma$ 、 $\tan \delta$ を未知数として  
この連立方程式を解けばよいわけです。

ところが  
導体損失の関数 $\alpha_c$   
誘電体損失の関数 $\alpha_d$   
特に導体損失を表す関数が、、、





この場合は明確ですが、



実態にあったclosed formの式はもちろん  
電磁界解析をしたところでこれほどへんてこな条件では $\alpha_c$ を表現できません。

## 線路幅の違うストリップ線路共振器

- 但し関数  $\alpha_c, \alpha_d$  はシミュレーションに基づく近似式を用いる

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

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

仕方がないので線路幅  $w$  について1次の近似式を仮定して、  
近似式に含まれる係数はシミュレータを使って探してゆくことにします。

ここから

$\sigma$  なり  $\tan \delta$  に  $eff$  という添え字をつけます。

ここで使う近似式の係数を決めるためには

シミュレータなり、近似式なり、あるいは もっと厳密な導体損失を表現する関数なりいろいろな方法がありますが、

今のところ何をつかおうと、

$\sigma_{eff}$  は 物理的な金属の導電率ではなく、

金属の導電率に、荒さだとか密度だとか、導体のエッジの角の鋭さだとか

実験に使った試料には含まれているさまざまな効果をその

シミュレータなり導体損失の理論式なりに加味した

実効値という意味合いだからです。

## 線路幅の違うストリップ線路共振器

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_c(w_1, \sigma_{eff}) + \alpha_d(w_1, \tan \delta_{eff}) \\ \alpha_2 = \alpha_c(w_2, \sigma_{eff}) + \alpha_d(w_2, \tan \delta_{eff}) \end{cases}$$

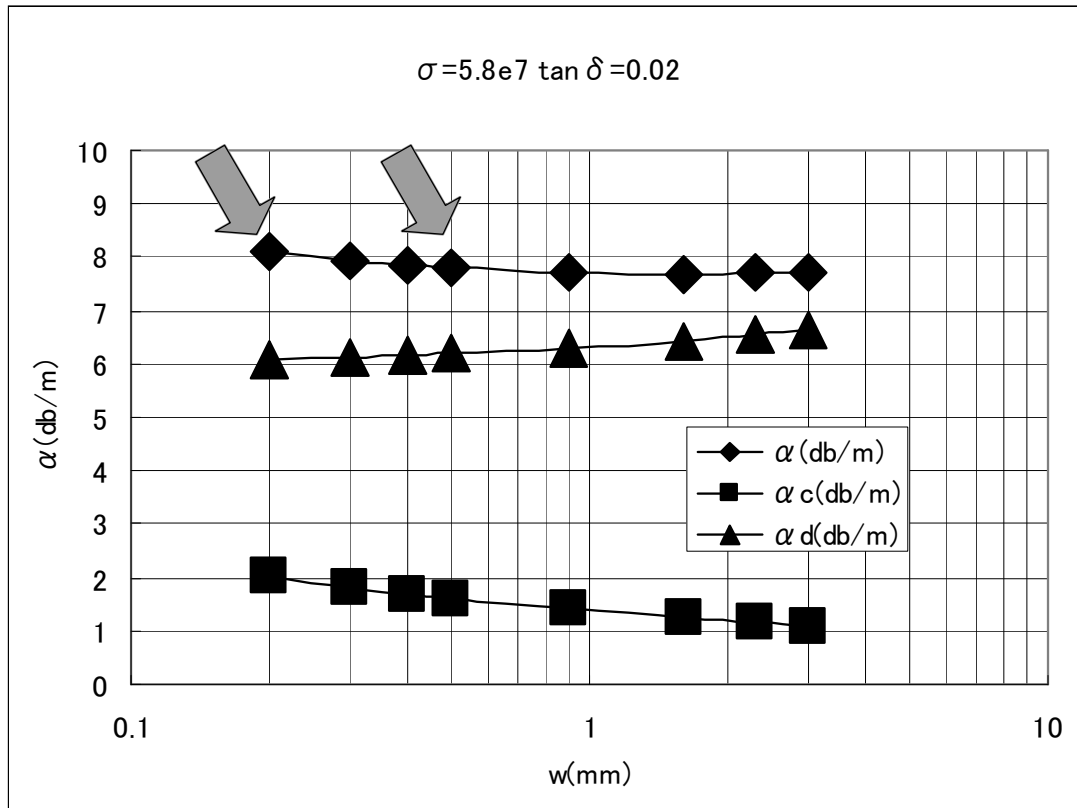
$$\alpha = \alpha_c(w, \sigma_{eff}) + \alpha_d(w, \tan \delta_{eff}) \quad (2)$$

とまあ、いささか制限はあるものの、これで、 $\alpha_c, \alpha_d$ は単なる一次式に置き換えられ  
連立方程式は簡単に解け  
二つの試料のパラメータの周りで実効導電率  $\sigma_{eff}$ 、実効  $\tan \delta_{eff}$  がわかるはずです。

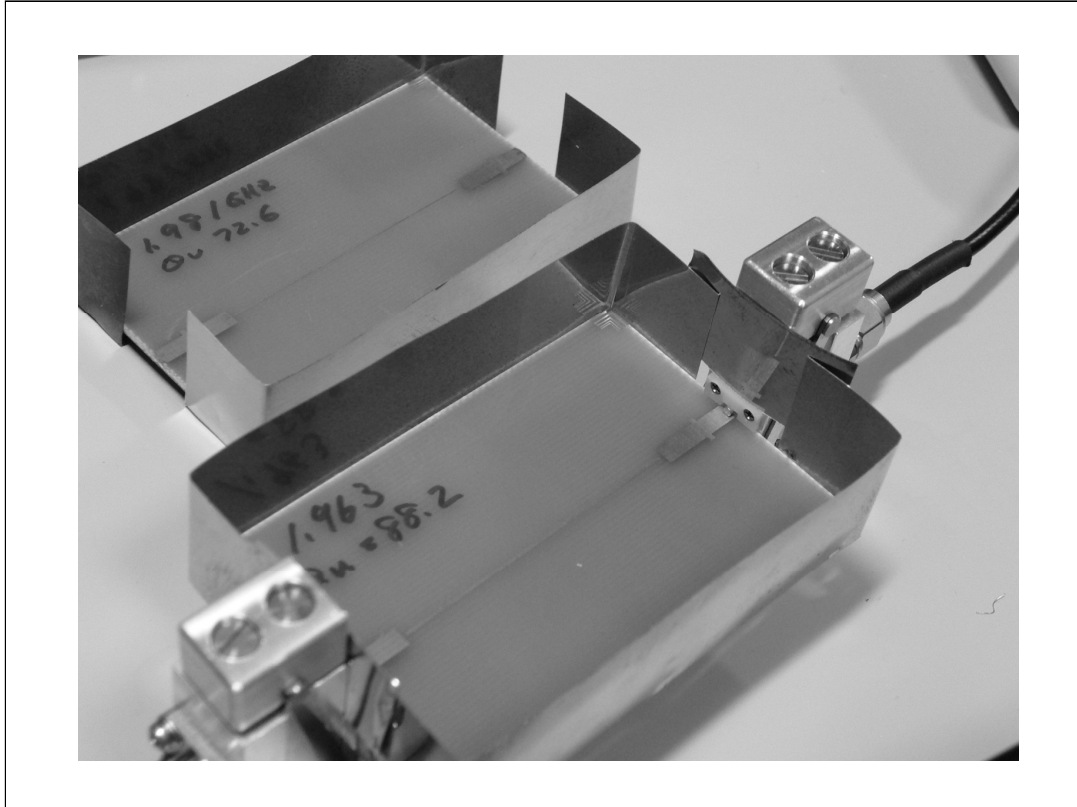
単一の製法で製作した試料による  
基板材料の誘電体損失と導体損失の測定

- 背景と目標
- 方法
- 実験
- むすびと今後の課題

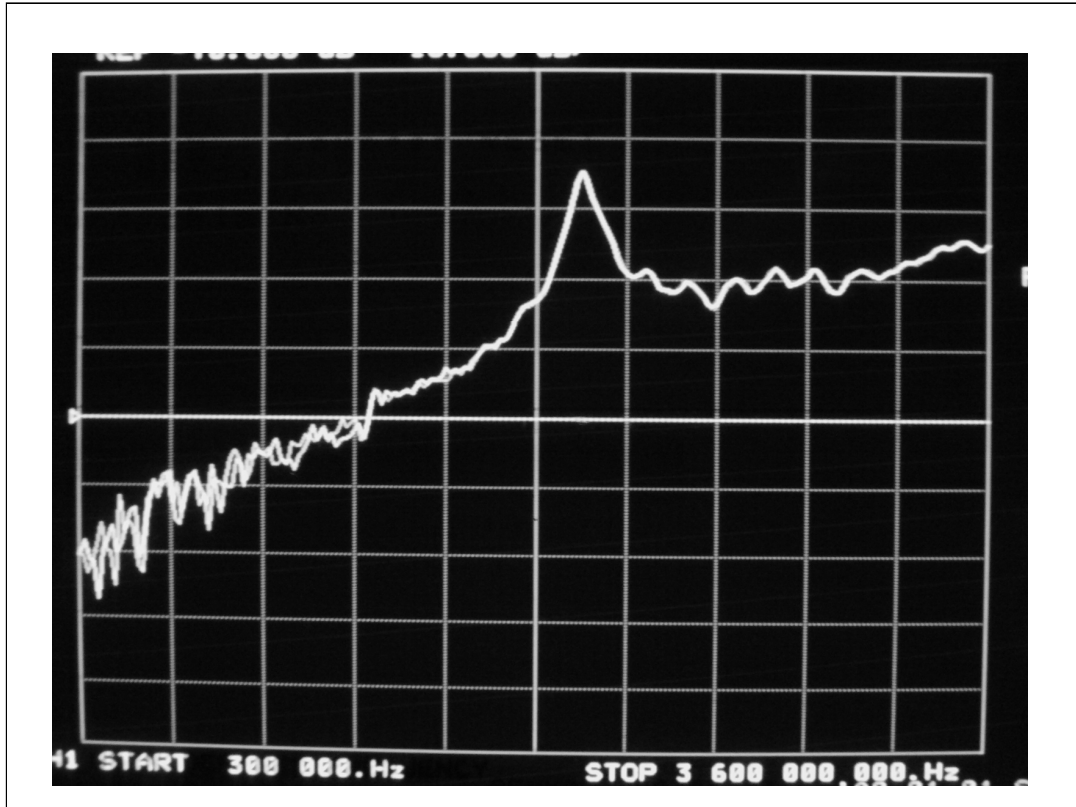
で実際にやってみた実験の報告です。



まずは、 $\sigma 5.8e7$ ,  $\tan \delta 0.02$ というありきたりの値で計算してみました。  
 ここから、 $\alpha$ が多少なりとも違っている、しかも実用的な範囲で  
 線路幅の違う二つの試料を選びます。  
 今回は $w=0.2$ と $0.5$ を選びました。

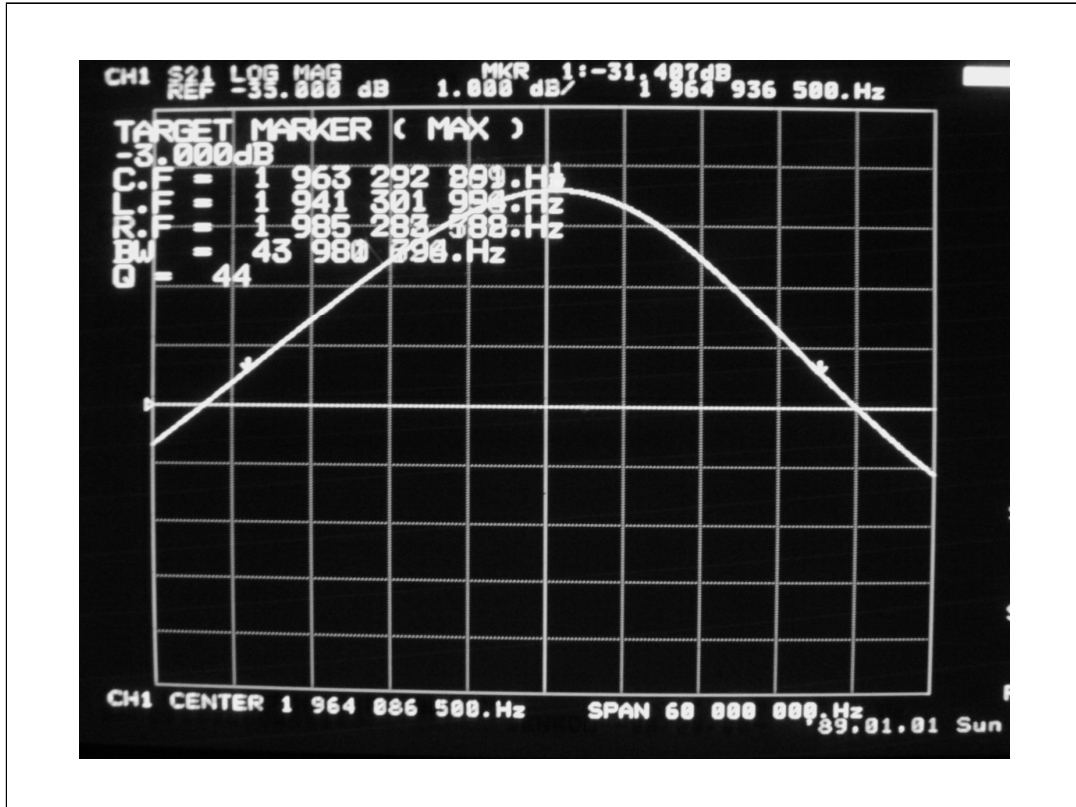


実際の試料です。向こう側が線路幅0.2 手前が0.5  
Yokowoさんのgigaクリップっていうコネクタを使っています。

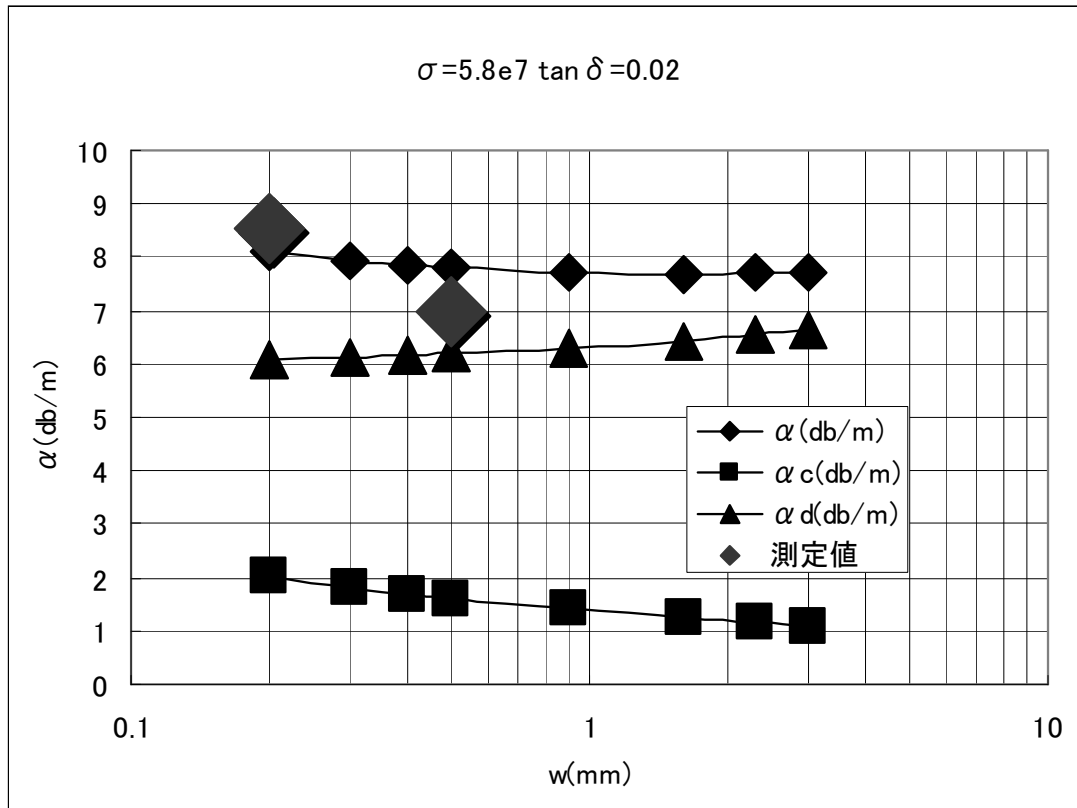


予定通りの共振周波数で共振していること、  
そして寄生的な反応がないことを確かめて



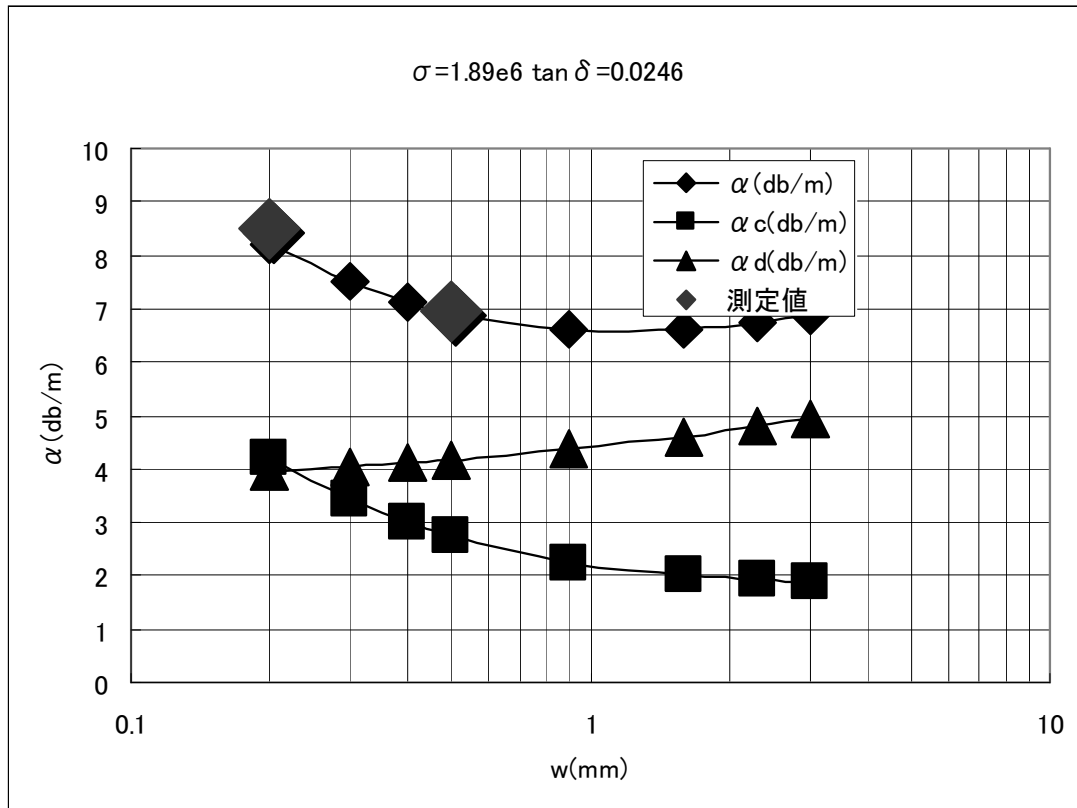


安直ですが、ネットアナのカーソルで共振Qを測定しました。で

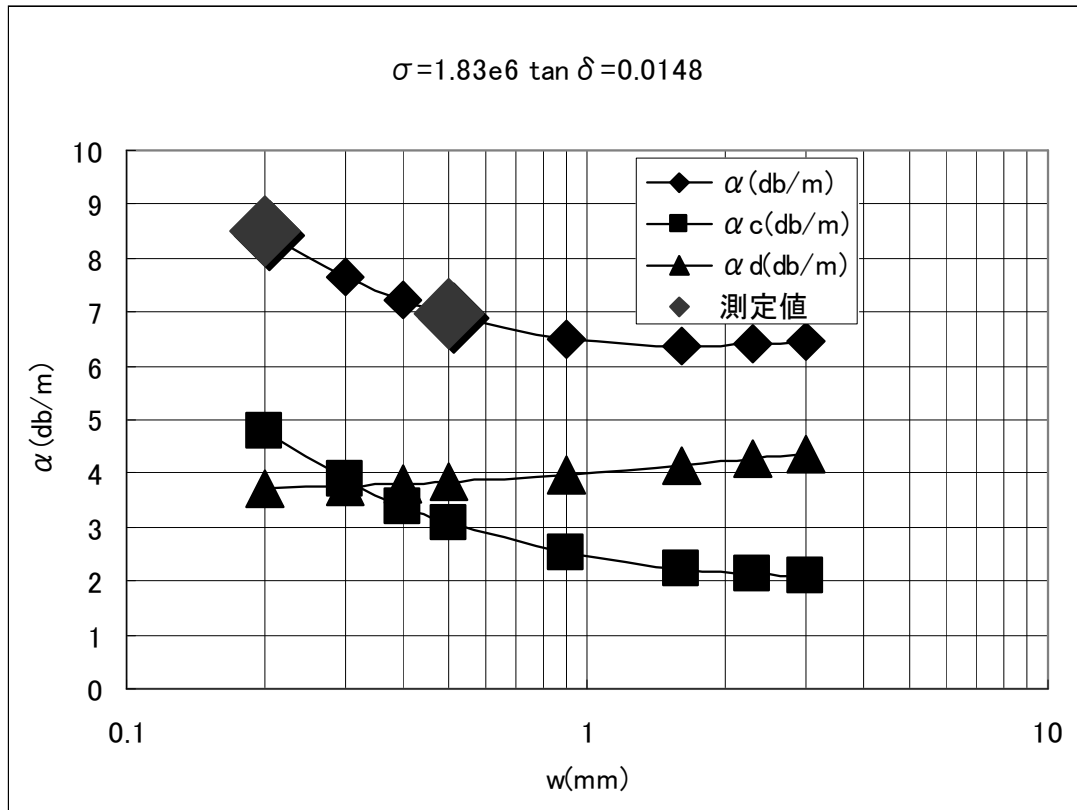


当初試算したグラフに測定結果をプロットしてみると盛大にずれています。  
 線路幅に対する損失の依存性が、予想よりずっと大きい  
 つまり導体損失は、当初試算した値  $5.8e7$ よりずっとでかいはずです。

この赤い測定値に矛盾しないように  
 シミュレータに与える  $\sigma$   $\tan \delta$ を  
 連立方程式を解いて決めます。

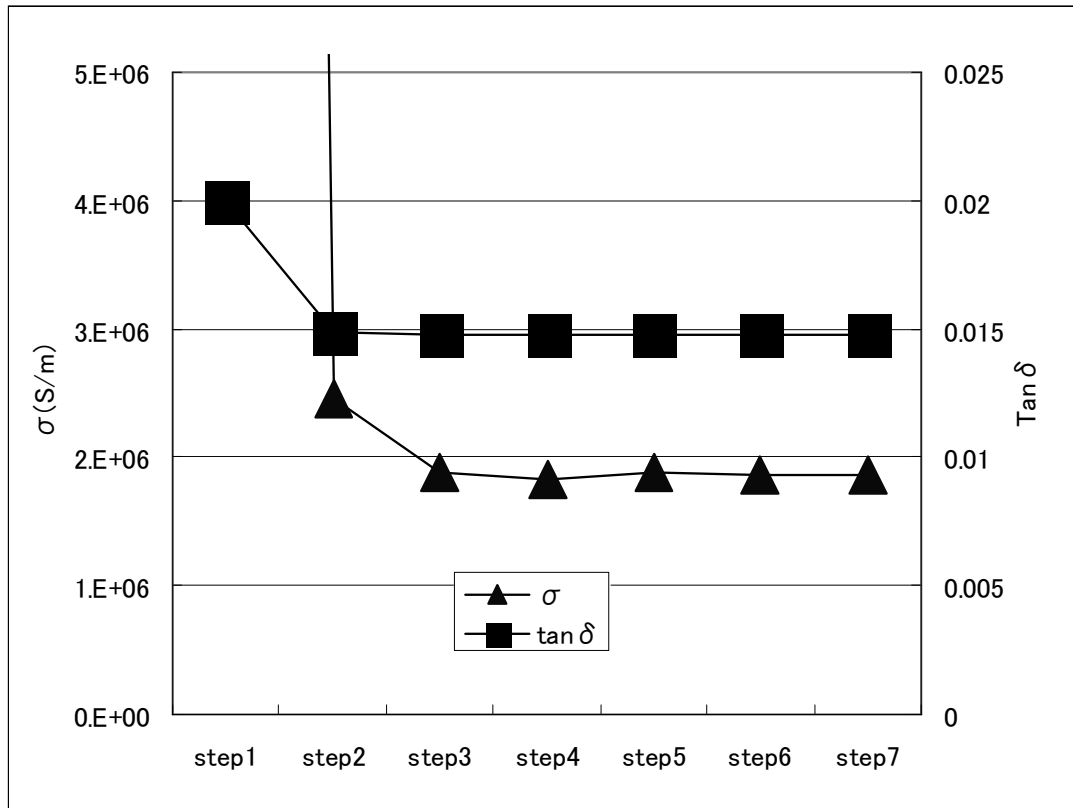


でもやってみるとちょっとずれます、  
 近似式に含まれる係数の適用範囲が微妙にずれてしまうのです。  
 そこで、新しい  $\sigma_{eff}$  と  $\tan \delta_{eff}$  の付近で近似式の係数をさらに修正して  
 連立方程式をもう一度解くと



ちゃんとなります。

実は



この近似式の修正と連立方程式を解きなおすことを7回繰り返しました。

でもstep3程度でほぼ収束しています。

近似式として一次式を使ったのが荒っぽすぎるかと心配でしたが、この程度なら一次近似式でよさそうです。

## 実験結果 Thickmetalモデル

	$\sigma_{\text{eff}}(\text{S/m})$	$\tan \delta_{\text{eff}}$
初期値	$5.8 \times 10^7$	0.02
測定値	$1.83 \times 10^6$	0.0148

Sonnet professional  
セルサイズ50um  
Thick metal 3層モデル  
2GHz

で、これが最終結果です。

初期値との違いを見ると、  
FR4の $\tan \delta$ が 思いのほか良いこと  
導体損が 猛烈に悪いことに驚きます。

注意しなければならないのはやはりこれが特定のシミュレータなり解析条件に依存した  
実効値だということです。

もちろん私の立場上sonnet professionalを使いました。

Sonnetでは導体の解析モデルがいくつも実装されていますが、ここではThickmetalモデル  
という、少し贅沢なモデルを使っています。

他のモデルやシミュレータとの比較には注意が必要です。

## 実験結果 normal導体モデル

	$\sigma_{\text{eff}}(\text{S/m})$	$\tan \delta_{\text{eff}}$
初期値	$5.8 \times 10^7$	0.02
測定値	$1.12 \times 10^7$	0.016

Sonnet lite  
セルサイズ50um  
Normal導体モデル  
2GHz

できれば、無料のSonnetで通用するデータをだしたいので、Normal導体モデルでもやってみました。

Thickmetalモデルの場合と随分違いますが、Tandについてはやはり0.015程度が普遍的な値なようです。一方導体は導体モデルに依存しますが、いずれにせよ純銅とはかけ離れています。

これがいかなる理由によるものかはわかりません。導体と基板表面の界面の荒れが一番きになりますが、導体のエッジの荒れや角の特異点もやばそうです。いずれにせよ現実の導体の物理的な効果を満足に再現できるシミュレータも理論式も存在しないのでこのような実効導電率という考えを導入するのもリーズナブルな方法だろうと考えます。

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

- 背景と目標
- 方法
- 実験
- むすびと今後の課題

以上、実験結果をご紹介します。



## むすび

- 誘電体損失と導体損失を
  - 単一の製法の
  - 実製品と同製法で
  - 実製品と同じモードで
    - 測定した。

むすびです。

実製品と同じプロセスとモードを使った試料で誘電体損失と導体損失の評価をしました。  
そして、

## 課題

- 単一試料複数モードを使用した評価法
- 一般的なモデルへの適用
- 他のプロセスへの適用

今後の課題ですが、

まず、方法として二つの試料でなく複数モードを使った方法も考えられるので、時間が有れば検討してみたいです。

それより、やはりこんかいの方法のシミュレータを使うと結果の普遍性に問題があるのでなにか方策が必要だと思います。たぶん

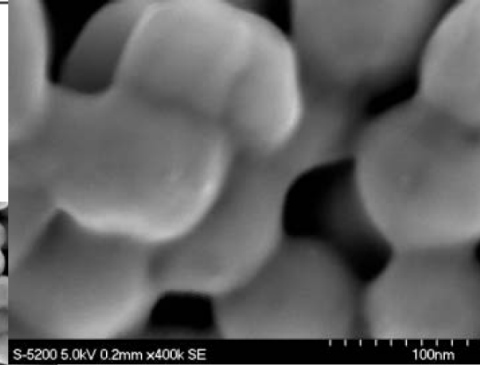
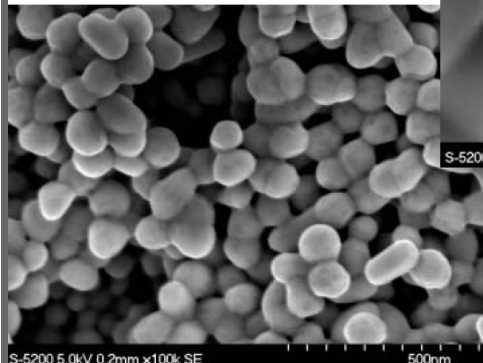
やはりよく知られた理論式を使って近似式の係数を出すことになると思います。これをやる必要があるでしょう。

その上で、他のプロセス、

# 導体印刷法

XA-9019からの発生粒子

PET上 150°C30分硬化



<http://www.fkkasei.co.jp/>

こういった金属粉の印刷法を使った導体が高周波でどのように振舞うかを調べて見たいと思います。