

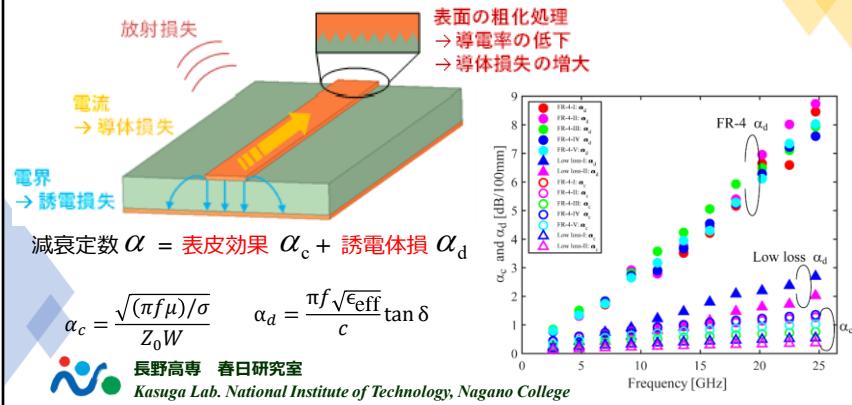
BCDRを用いた基板の誘電損失と 表面粗さによる電気伝導性の測定

5E 春日研究室 柳原魁人

これから「BCDRを用いた基板の誘電損失と表面粗さによる電気伝導性の測定」について、発表を始めます。

研究背景

- これからの社会(AI, 5G/6G)を支えるのは高周波技術。
- データセンター内等のハードウェアでは、とても高い周波数(100 GHz)での通信が必要になる。
- 高周波で基板での損失が大きくなる。



研究の背景について説明します。

これからの社会では、AIや5G、6Gの発展に伴って、サーバやデータセンターで**100GHz級の通信**が必要になります。

しかし、周波数が高くなると、基板での損失が大きな問題になります。

損失は主に表皮効果による「導体損失」と基盤材料自体での「誘電損失」があります。

右下のグラフは、一般的なFR-4という基板材料と低損失材料の比較です。FR-4は低成本で低周波では低損失ですが、高周波では誘電損失が増大し支配的になります。

誘電損失の研究は進んでいますが、導体損失、特に表皮効果や表面粗さの影響については、評価が十分ではありません。

研究の目的・やったこと

目的

- 表面粗さによる電気伝導性への影響を明らかにする。

やったこと

- 平衡円板共振器法（BCDR法）による誘電率の測定。
- 導電率測定のため誘電率の測定を行う。



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

本研究の目的は、**表面粗さが電気伝導性に与える影響を明らかにすること**です。

その評価には、導電率と表皮効果の評価が必要です。

手順として、まず標準試料で基板の誘電損失を求め、次に評価試料を測定し、導体損失を算出します。

今回は、誘電損失の算出までを実施しました。

基板材料の比較

基板名	メーカー名	公称厚	用途
L-6504C2 (FR-4)	東芝ケミカル	0.3mm	高耐久性、高熱伝導性、低価格であり、1GHz以下の帯域でよく使われる。
R-5775GH (MEGTRON6)	パナソニック	0.3mm	1GHz以上・高速通信向け高性能材料。

MEGTRON 6 は FR4 に比べて 高周波帯でも低損失な材料で、
サーバやデータセンタなどで使用されていく。
MEGTRON6のような低損失材料の評価が必要



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

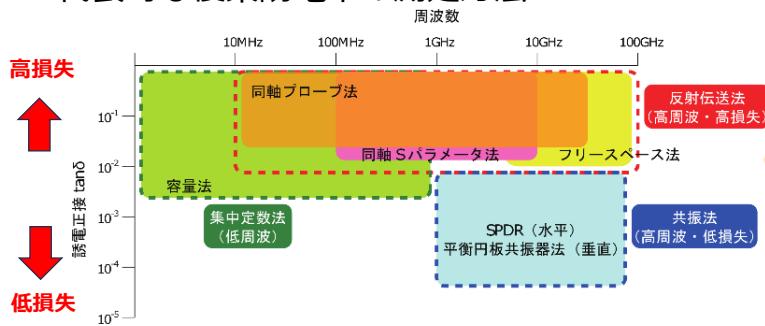
今回の測定対象は2種類の基板材料です。

一つは、低コストで広く利用される**FR-4**で、主に1GHz以下の低周波帯向けです。

もう一つは、高周波対応の低損失材料**MEGTRON6**で、サーバや高速通信機器に用いられます。

今後の高周波通信では、MEGTRON6のような高性能基板の特性を正確に評価し、設計やシミュレーションに活用することが不可欠です。

代表的な複素誘電率の測定方法



共振法, BCDRが今回の材料, 誘電率, 導電率測定に適している



長野高専 春日研究室

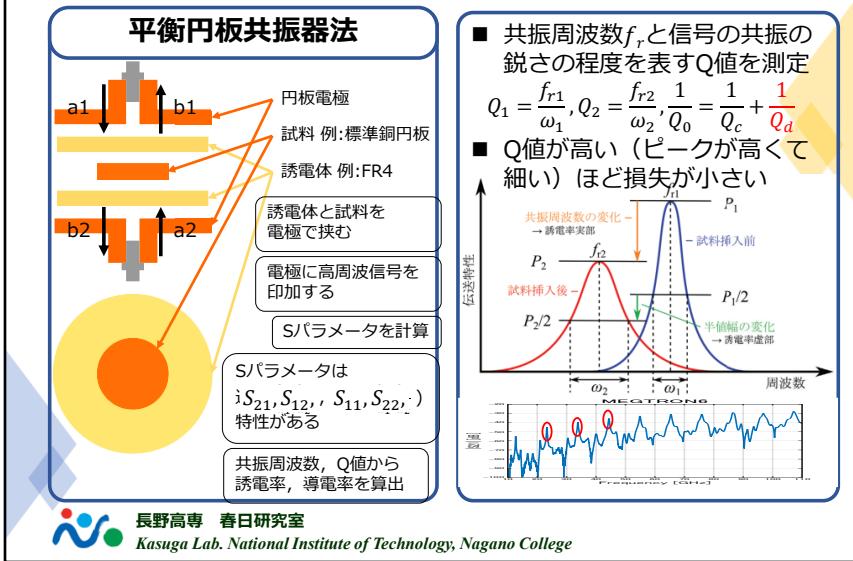
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

こちらに複素誘電率の代表的な測定法を示しました。

今回測定対象とするMEGTRON6は**高周波帯で低損失材料**であり、この測定に適した手法が共振法, BCDR法です。

BCDR法は誘電率だけでなく、導電率の測定も可能なため、本研究で採用しました。

平衡形円板共振器の測定原理



BCDR法の測定原理について説明します。

BCDRとは「平衡円板共振器」の略称です。

構造はこのようになっています。

この図のように、測定したい基板を円盤電極で挟み込みます。

一方の電極から高周波信号を入力し、基板を透過してきた信号をもう一方の電極で測定します。周波数を変動させ、その際の電力比を周波数ごとに評価します。

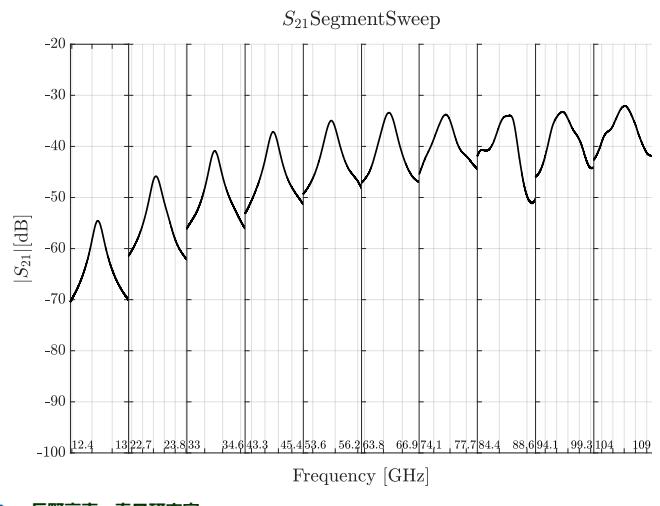
この透過特性が、Sパラメータの一つであるS21です。

右下のグラフが、実際に測定されるS21の例です。特定の周波数で鋭いピークが現れます。この周波数を「共振周波数」と呼びます。このピークの鋭さを表す指標が「Q値」です。Q値が高い、つまりピークが鋭いほど、その材料の損失が小さいことを意味します。

Q値は導体損失によるものと、誘電損失によるものがあります。

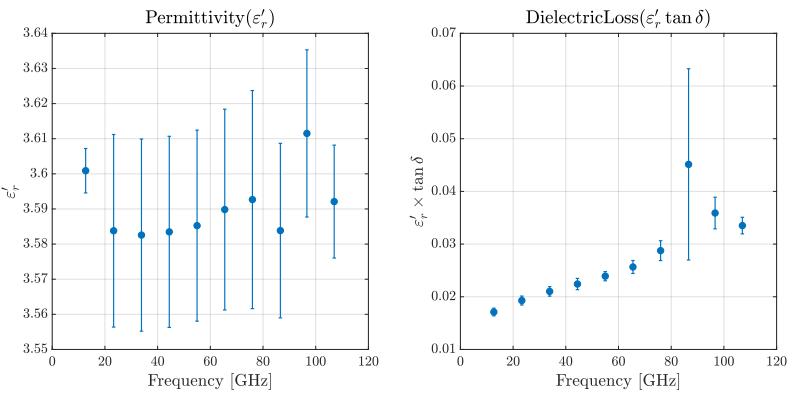
BCDR法では、この共振周波数とQ値を精密に測定することで、材料の誘電率や導電率を算出します。

S21 セグメントスイープ



長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

複素誘電率

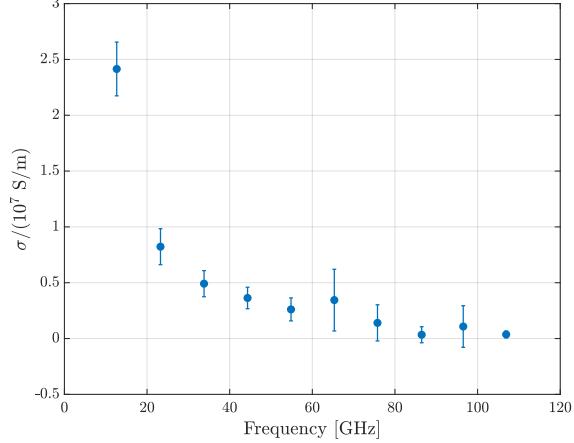


長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

導電率

Conductivity

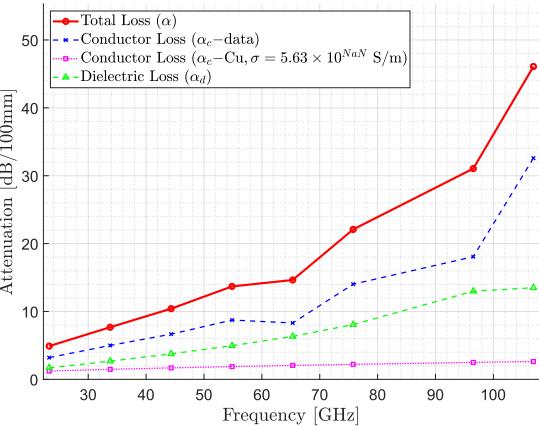


長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

減衰定数

Attenuation Constant Simulation
($W = 0.521 \text{ mm}$, $H = 0.2986 \text{ mm}$, $T = 18.0 \mu\text{m}$)



長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

結果と課題

- ・表面粗さの評価のために導電率を測定をした。
- ・今回は導電率測定をし、減衰定数の算出をした。
- ・MEGTRON6基板で導電率を測定することができた。
- ・導電率から減衰定数の算出をして、高周波において導体損失には表皮効果の影響で損失が増大することがわかった。



長野高専 春日研究室

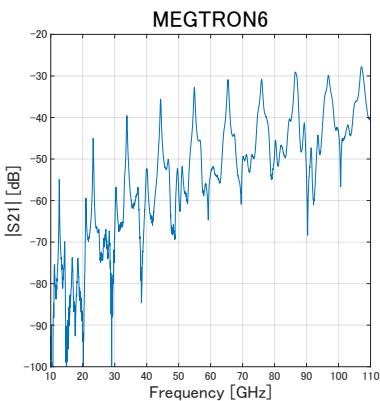
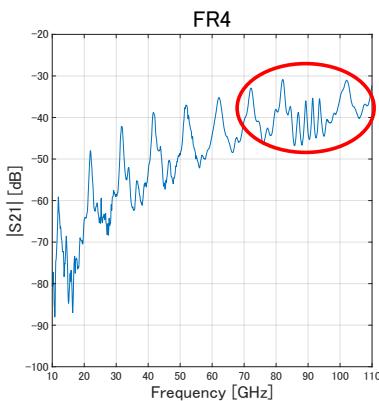
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

今回、BCDR法によりMEGTRON6の誘電率を高精度に測定できることを確認しました。

今後は、このデータを基に導電率の測定を進め、表面粗さが電気伝導性に与える影響を評価します。

以上で発表を終わります。

Sパラメータ



FR4→損失高，ばらつき多，鋭くないので損失が大きい

MEGTRON→損失低，ばらつき少，鋭いので損失が小さい



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

こちらが、実際に測定したS21の透過特性です。左がFR-4、右がMEGTRON6の結果です。

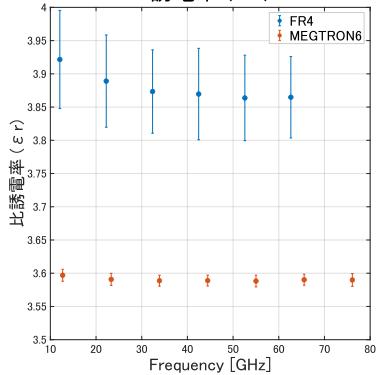
MEGTRON6のピークはFR-4に比べて鋭いことがわかります。

ここからMEGTRON6の方が損失が小さいことがわかります。

また、この赤丸で囲んだ高周波の部分については、ピークの形が崩れており、今回の誘電率の計算から除外しました。

誘電損失

誘電率 (ϵ'_r)



FR4 : 6回 MEGTRON6 : 4回

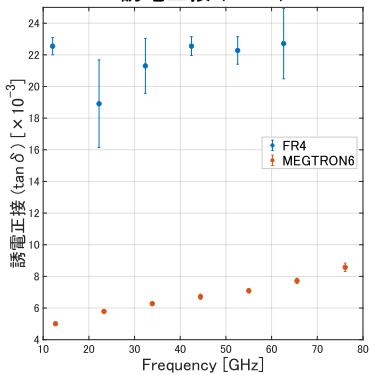
FR4→損失高、ばらつき多

MEGTRON→損失低、ばらつき少

長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

誘電正接 ($\tan \delta$)



$$\epsilon_r = \epsilon'_r(1 - j \tan \delta)$$

$$\frac{1}{Q_d} = \frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q_c}, \tan \delta = \frac{1}{Q_d}$$

こちらは、Sパラメータの測定結果から算出した基板材料の誘電特性を示すグラフです。

左が比誘電率 (ϵ'_r)、右が誘電正接 ($\tan \delta$) で、青がFR-4、赤がMEGTRON6です。

測定はFR-4で6回、MEGTRON6で4回行い、平均値と、測定のばらつきを示すエラーバーを表示しています。エラーバーが短いほど測定の信頼性や再現性が高いことを意味します。

横軸は周波数です。

今回はこのQcがわかっている試料を使ったので、Qdから誘電正接を算出することができました。

まず、左の比誘電率をご覧ください。これは材料が電場に応答してどれだけ分極しやすいかを示す値で、主に**信号の伝搬速度**を決定します。値が大きいほど**信号は遅くなります**。これは直接的なエネルギー損失を示す指標ではありません。

今回の結果では、両材料に大きな差はありませんが、MEGTRON6の方がやや低く、エラーバーも短く、安定した特性を示しています。

次に、右の誘電正接をご覧ください。これは、信号エネルギーが熱として失われる**誘電損失の大きさ**を示す指標です。

結果は、MEGTRON6は全周波数帯でFR-4より低く、低損失かつ高品質な伝

送特性を持っています。

FR-4は高い損失値を維持したままほぼ一定ですが、MEGTRON6は非常に低い値を保ちながら、周波数が高くなるとわずかに増加する傾向があります。

エラーバーに注目すると、MEGTRON6はばらつきが小さく、再現性の高い測定結果が得られています。

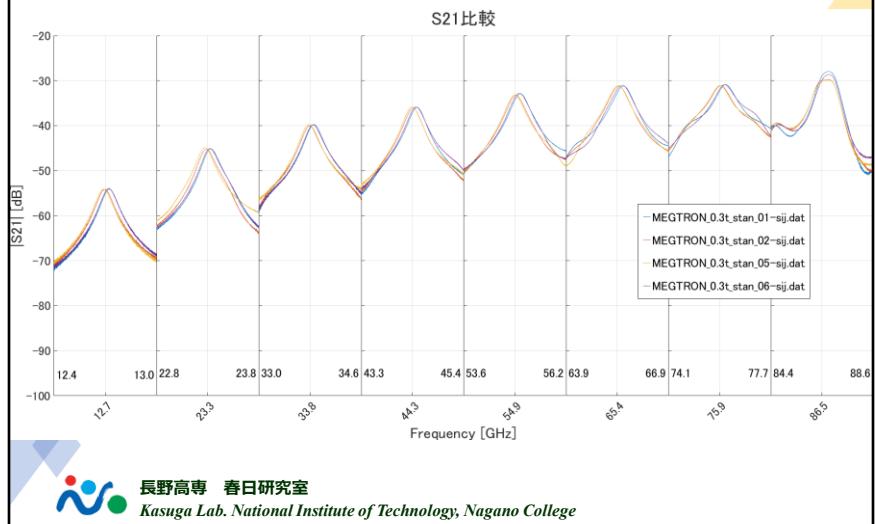
以上から、MEGTRON6は広い周波数帯域で安定した低損失特性を示す、高周波用途に適した基板材料であることが定量的に確認できました。

- $\frac{1}{Q_c} = \frac{1}{Q_0} - \tan \delta$
- Q16. スライド8の誘電特性のグラフで、FR-4の方がMEGTRON6よりも測定のばらつき（エラーバー）が大きく見えます。これはなぜですか？
- A16. 主な理由は、FR-4が高損失材料だからです。
- 損失が大きいと共振ピークがならかになり、ピークの頂点や周波数幅（半値幅）を特定する際の読み取り誤差が大きくなります。また、FR-4はガラスクロスと樹脂の複合材であるため、場所による不均一性がMEGTRON6より大きいことも影響している可能性があります。

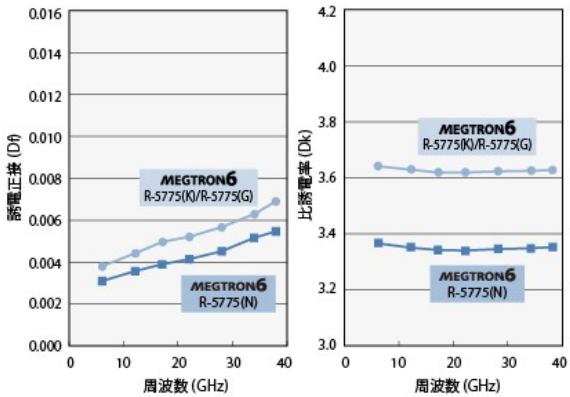


長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

MEGTRON6 基板での測定（セグメントスイープ）

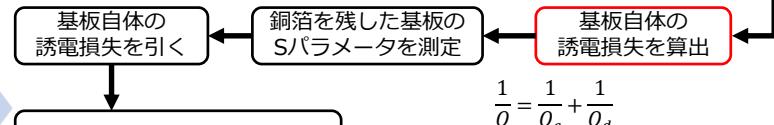
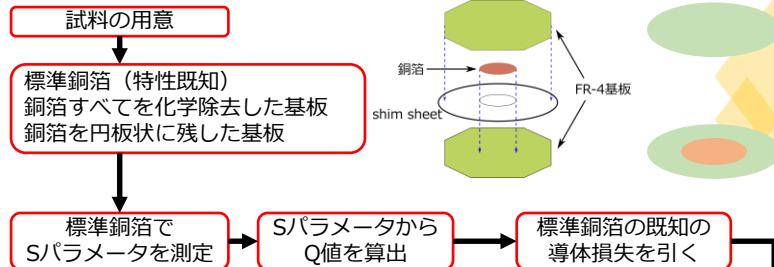


次は、帯域を細かく分けて測定したセグメントスイープの結果です。こちらでは、より安定したピークが得られており、再現性のある測定ができていることが分かります。



長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

実験手順



$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}$$

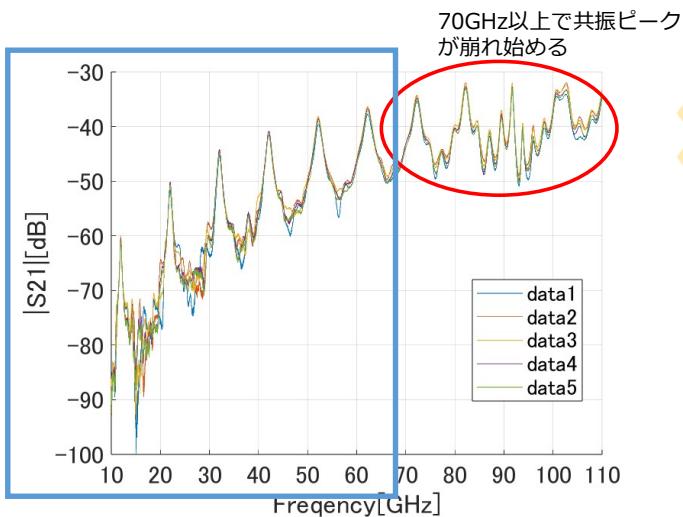
$$\frac{1}{Q_d} = \tan \delta$$

長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

まず試料を用意します。次に標準銅箔と基板でSパラメータを測定します。そこから標準銅箔の特性から求めた導体損失を引き、基板自体の誘電損失を算出します。

その誘電率を使って導電率を求めます。今回はこのチャートの基盤自体の誘電損失を算出するところまで行いました。

FR-4での共振ピーク

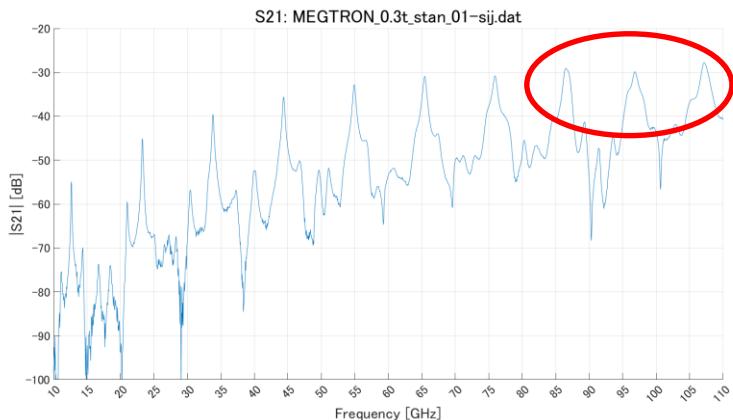


長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

これはFR-4基板で、VNAで観測された透過特性（S21）のグラフです。ご覧の通り、**70GHz以下の周波数帯**では、共振ピークが崩れず確認できます。しかし、スライドの赤丸で囲んだ**70GHzを超える高周波領域**になると、ピークの形状が崩れます。

そのため、70GHz以上の共振ピークから計算した誘電率、誘電正接は今回の結果からは除外します。

MEGTRON6 基板での測定（フルバンドスイープ）



長野高専 春日研究室

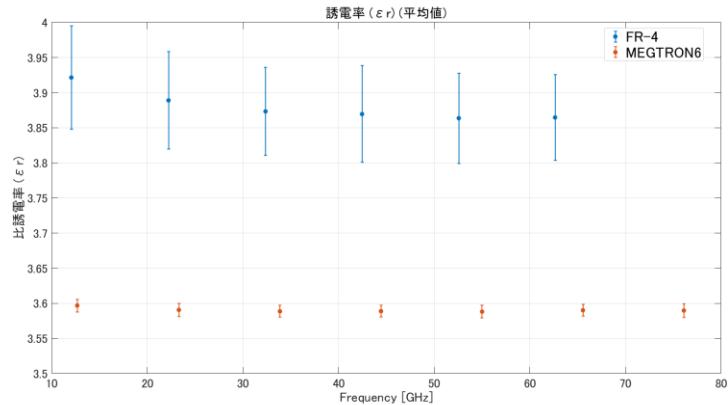
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

MEGTRON6基板を用いたSパラメータ測定の結果です。

80GHz帯でも共振ピークがある程度確認できており、FR-4では困難だった高周波領域でも測定が可能になっています。

しかし80 GHz より上の共振ピークが崩れているので、 ここから計算した誘電率、 誘電正接は今回の結果からは除外します。

誘電率

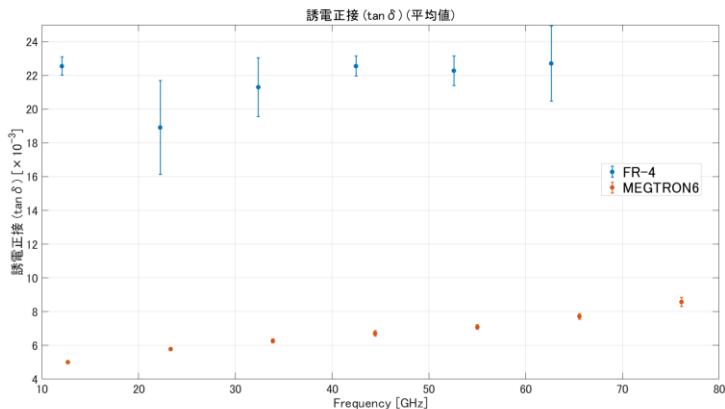


長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

こちらはVNAで測定したデータから誘電率を求めたものです。そして、それを複数回行ったものの平均を求めて、そのばらつきを併記したものです、

FR4のほうがばらつきが大きく、誘電率も高くなりました。

誘電正接



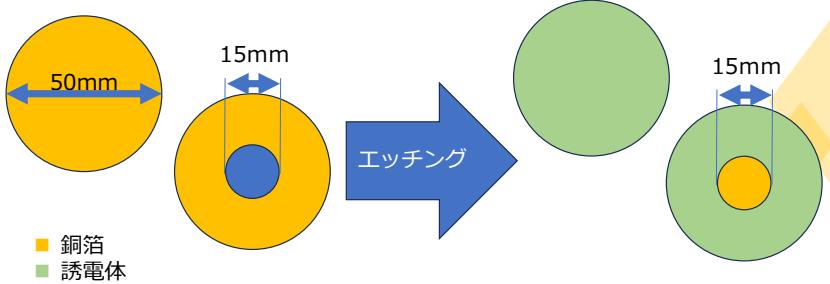
長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

こちらは同じように誘電正接の結果をまとめたものです。

こちらもメグトロン基板のほうが損失が低く、ばらつきも少ないです。

今回の結果は先行研究で求めているデータとある程度おなじになったので実測はうまくいったと言えます。

試料作製手順



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

エッチングの要点（安全）

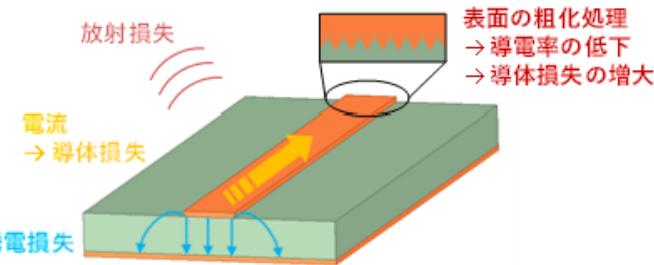
- ・**温度管理**：約40～42°Cで行うと安定します。
- ・**換気とPPE**：換気、耐薬品手袋、ゴーグル、ラボコートを必ず着用。
- ・**廃液処理**：下水に流さず、所属機関の手順で処分。
- ・**作業台や床の保護**：新聞紙やビニールシートを敷き、薬品で周囲を汚さないようにする。



長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

研究背景

- これからの社会を支えるのは高周波技術。
- データセンター内では、とても高い周波数での通信が必要になる。
- ハードウェア（基板・ケーブル・コネクタ）には **100GHz** までの通信性能が求められる。
- 高周波信号では、基板の材料特性が通信品質・損失に大きく影響。
- プリント基板では **表皮効果** や **誘電体損失** による損失が発生。



長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

スマートフォンやAI、自動運転などを支えるのは、高速で大量のデータを扱う「高周波技術」です。

特にデータセンターでは、**100GHz級の通信**が求められます。

このような高周波では、信号が通る**基板の材料特性**が通信品質に大きく影響します。

信号が基板を通るときには「損失」が発生します。主な損失は次の3つです：

誘電損失：絶縁体で熱に変わる損失（周波数が高いほど増加）

導電損失：銅配線で抵抗による損失（表皮効果で急増）

放射損失：信号が電波として漏れる損失

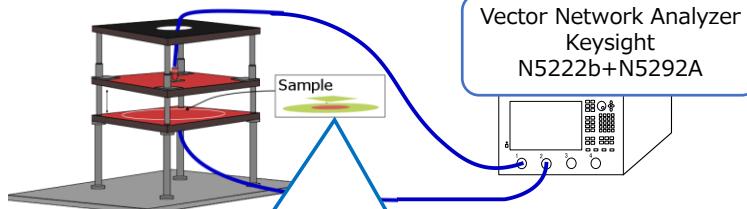
特に高周波では、**誘電損失と導電損失の両方が深刻化**します。

導電損失は「表皮効果」により、電流が導体の表面に集中し、流れる道が狭くなることで抵抗が増えます。

導電率の測定

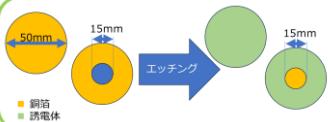
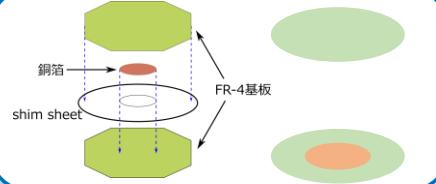
平衡形円板共振器

Balanced type Circular Disk Resonator : BCDR



Vector Network Analyzer
Keysight
N5222b+N5292A

同軸ケーブル



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

- 研究背景
- 研究の目的・やったこと
- 平衡型円板共振器法
- 測定結果
- まとめ



長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

この流れで発表していきます。

今までやったこと

- 試料の作成：ハサミで円板状に切り出し
- 銅箔のエッティング：円板状に銅箔を残す加工を実施
- FR-4基板の複素誘電率を測定（BCDR法）
- FR-4基板の導電率を測定／推定
- MEGTRON6基盤の測定



長野高専 春日研究室
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

この目的を達成するために、これまでにここまでを行ってきたことです。まず、測定に使用する試料を作成しました。一般的な基板材料であるFR-4基板を円板状に切り出し、次にエッティングという化学処理を行い、中心に円形の銅箔が残るような加工を施しました。そして、この試料を用いて、BCDR法により、まず基板自体の電気的特性である『複素誘電率』を測定しました。その後、銅箔付きの基板と比較することで、銅箔の導電率の測定・推定を試みました。