EMラボ株式会社

ミリ波帯では「誘電率」も「導電率」も必須！
@MWE2023 企業セミナー

花田克己

2023/11/29

KEYSIGHT TECHNOLOGIES
Solution Partner

EM labs

1

本セミナーを聞いたらわかること

- 最先端のミリ波誘電率・導電率測定がどこまで進化しているか
- 測定装置・測定サービスの選び方留意点

EM labs

2

アジェンダ

- **はじめに**

- **基板の損失改善を深堀**
  - 基板の伝送損失と誘電率・導電率
  - ミリ波基板材料の導電率測定
  - ミリ波基板材料の誘電率測定

本日のメイン

- **誘電率測定いろいろ**
  - 機器メーカー様の悩み
  - 超低損失セラミックスのミリ波誘電率
  - メタサーフェス
  - 誘電率温湿度特性
  - 液体のミリ波誘電率
  - 粘着シートのミリ波誘電率

EM labs

3

正確な「測定」はビジネスの成功につながります

間違った測定をしても、数字だけは出てきます

いいデータが出た！　プレスリリースだ！　学会発表だ！　　発表後、測定が再現しない

いいデータが出た！　特許出願だ！　新製品開発だ！　　多額の投資をしたが製品は完成せず

改善したはずなのに！　このアイデアはダメなんだ！　他社が同じアイデアで成功

組織としての時間のロス、お金のロスはもちろん、
個人的にも恥をかく、立場がなくなる、など、
間違った測定がもたらす結果はすべてみじめです。
正確な測定はビジネスを正しい方向に導く道標です。

測定例を確認し、どんな治具がベストな選択かしっかり判断することが大事！

EM labs

4

EMラボ株式会社

ミリ波材料測定では世界のフロントランナーです

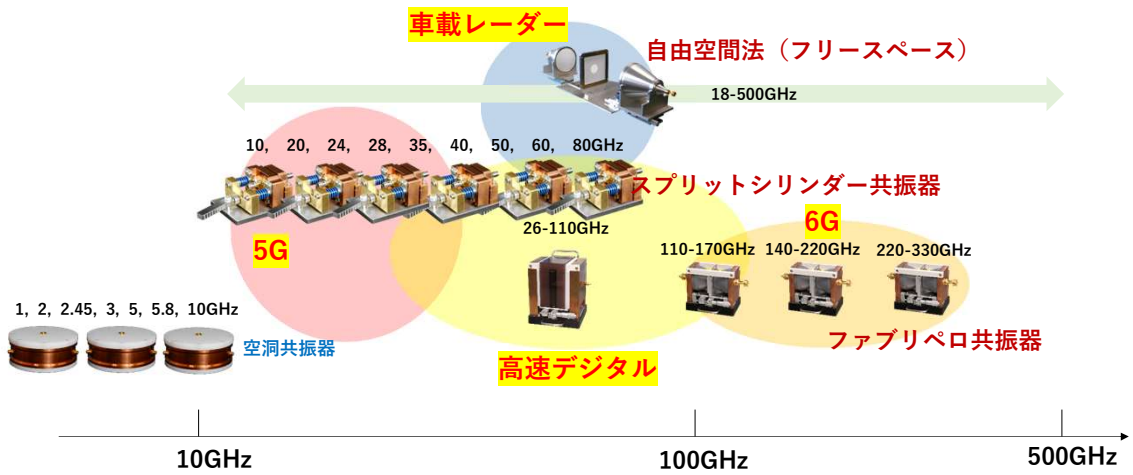
「誰でも」「正確に」測定できる装置を開発・製造・販売しています

「今すぐ」「正確な」結果が得られる受託測定サービスを提供しています

EM labs

5

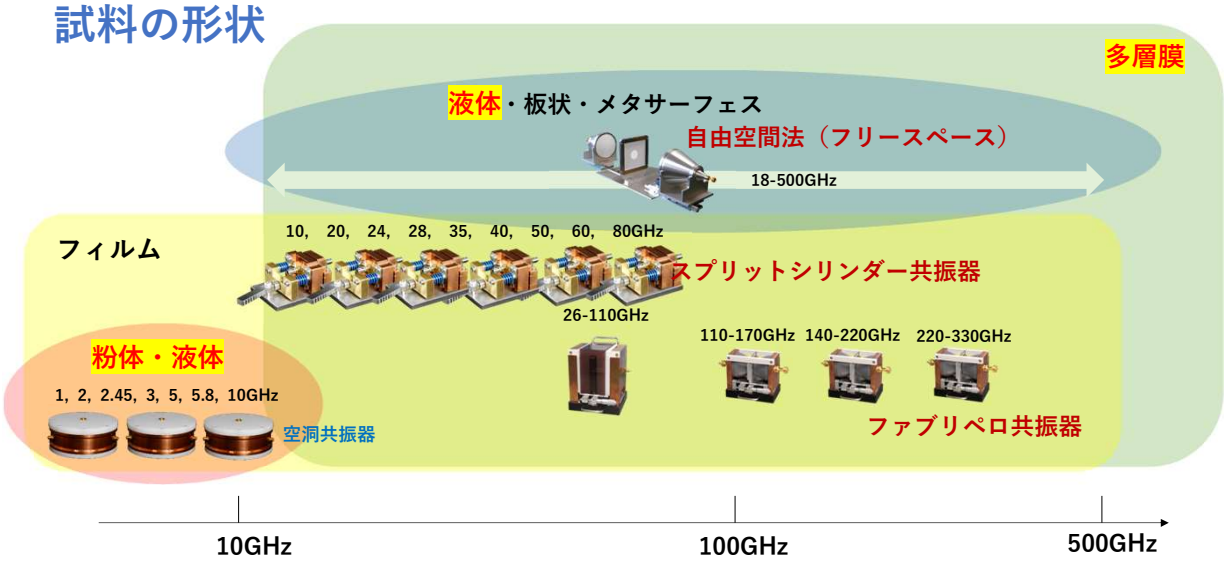
EMラボの製品群と対応する市場～誘電率測定～



EM labs

6

試料の形状



EM labs

7

新製品のご紹介

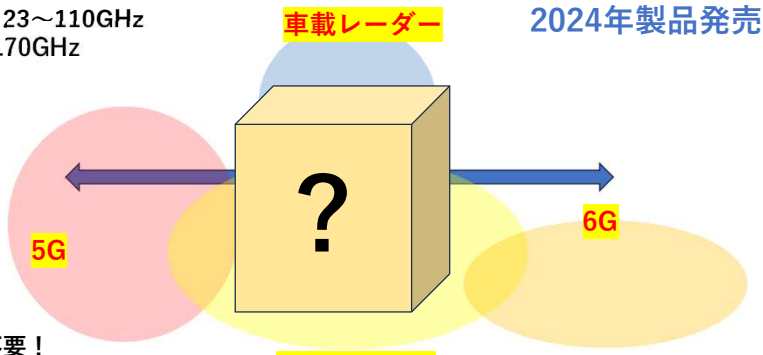
受託測定好評販売中！

2024年製品発売予定！

導電率高精度測定用ファブリペロ共振器

ブロードバンド：23～110GHz

Dバンド：110～170GHz



エッチング不要！

キャリブレーション不要！

銅箔でも銅板でも測定可能！

10GHz　100GHz　500GHz

EM labs

8

アジェンダ

- **はじめに**
- **基板の損失改善を深堀**
  - 基板の伝送損失と誘電率・導電率
  - ミリ波基板材料の導電率測定
  - ミリ波基板材料の誘電率測定
- **誘電率測定いろいろ**
  - 機器メーカー様の悩み
  - 超低損失セラミックスのミリ波誘電率
  - メタサーフェス
  - 誘電率温湿度特性
  - 液体のミリ波誘電率
  - 粘着シートのミリ波誘電率

キーワード

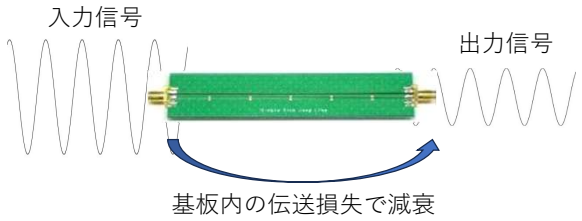
誘電率＝比誘電率＝誘電率実部＝ε‘＝Dk
誘電正接＝tan δ ＝誘電損失＝Df
導電率＝比導電率＝σ
※軟銅＝１とした時の導電率

本セミナーでは**Dk , Df , σ**を使用します。

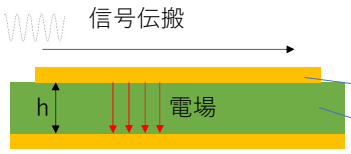
EM labs

9

基板の伝送損失(例：マイクロストリップライン)

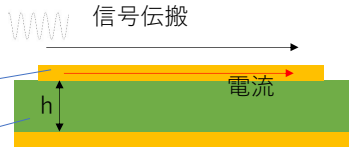


伝送損失の原因①：誘電損失



誘電体に電場が生じることで損失が生じる。
Dfが大きいほど損失が大きくなる。

伝送損失の原因②：導電損失



銅箔の抵抗値によって損失が生じる。
σが大きいほど損失が小さくなる。

導体
誘電体

いい基板は、①Dfが小さく　②σが大きい

EM labs

10

基板伝送損失の実際

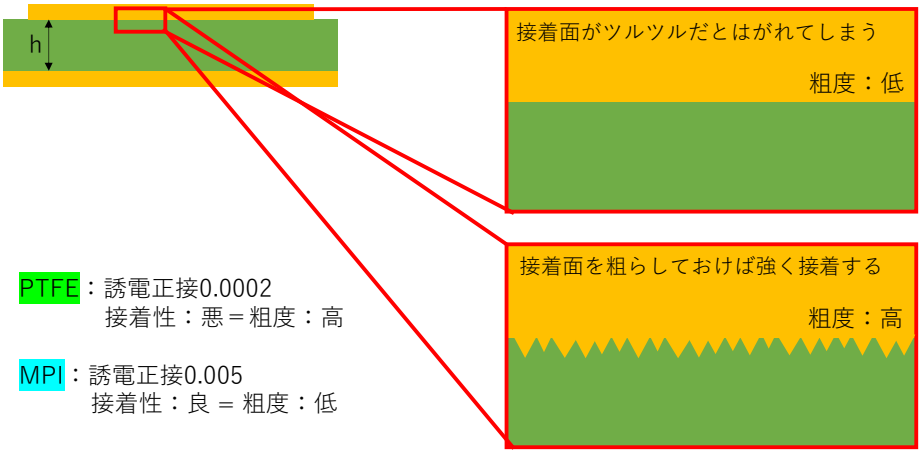
単に誘電体のDfを小さく銅箔のσを大きくすれば良いのでは？

- Dfとσは無関係？
- Dfとσどちらが大事？
- Dfとσは周波数によって変わる？
- Dfとσは評価できるの？

EM labs

11

樹脂と導電率の深い関係



PTFE：誘電正接0.0002
接着性：悪＝粗度：高

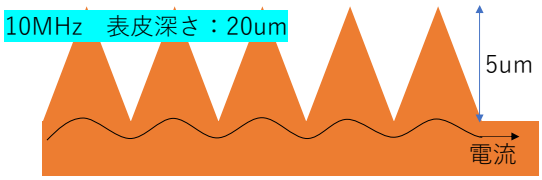
MPI：誘電正接0.005
接着性：良 ＝ 粗度：低

誘電正接？粗度？導電率？どういう関係がある？

EM labs

12

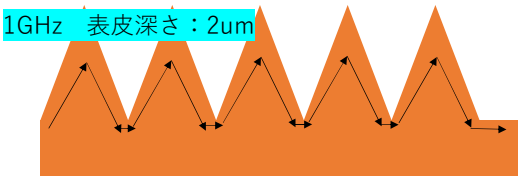
なぜ粗度が導電率に影響するの？



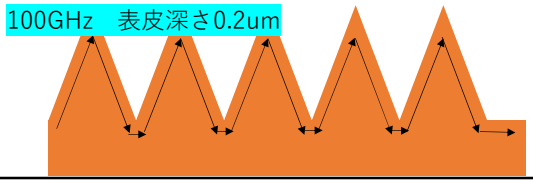
高周波では粗度が大きいと
表皮効果により導電率が悪化する！

まだ表皮深さが粗度に対して深いので導電率は悪化しない
低い周波数では粗度は導電率に影響しない

電流の経路が長いほど導電率が低くなる。



表皮を流れ始める
粗度が導電率に影響し始める



電流がほとんど表皮を流れている
粗度によって導電率が悪化する
高周波では粗度が顕著に導電率に影響する

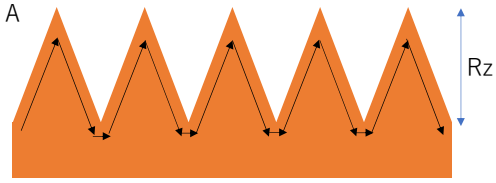
EM labs

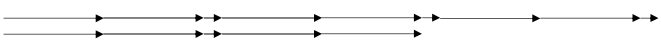
13

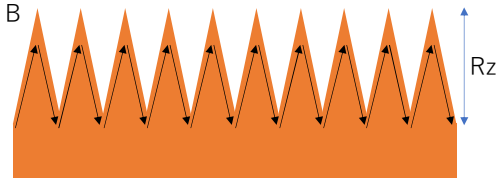
しかもRaRzで導電率が決まるわけではない。

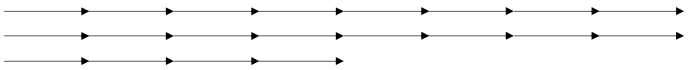
下図の黒線が長いほど導電率が低いことを意味する。

両者はRaもRzも同じであるが、経路長は。。。









Bの方が２倍も長い！
＝導電率は半減＝導電損は2倍！！

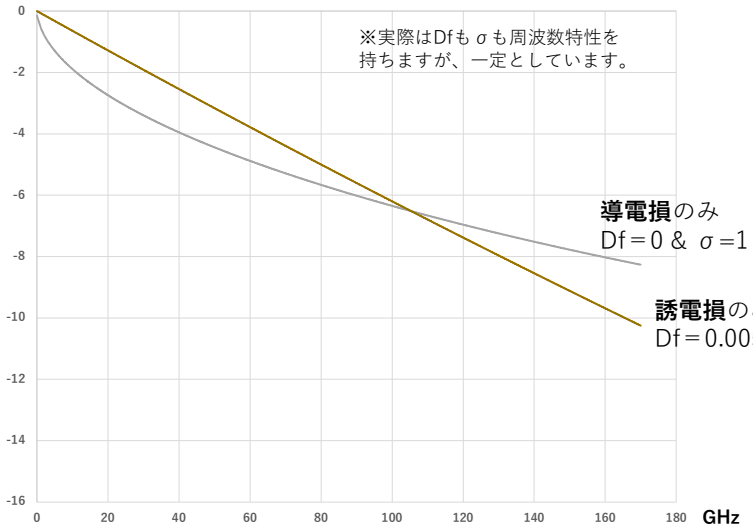
Rzが小さくても実は導電率は悪いかもしれない！

EM labs

14

導電損と誘電損による伝送損失のイメージ

MSLシミュレーション
誘電率：3.5
誘電体厚み＝50um
線路：50㎜
周波数：~170GHz



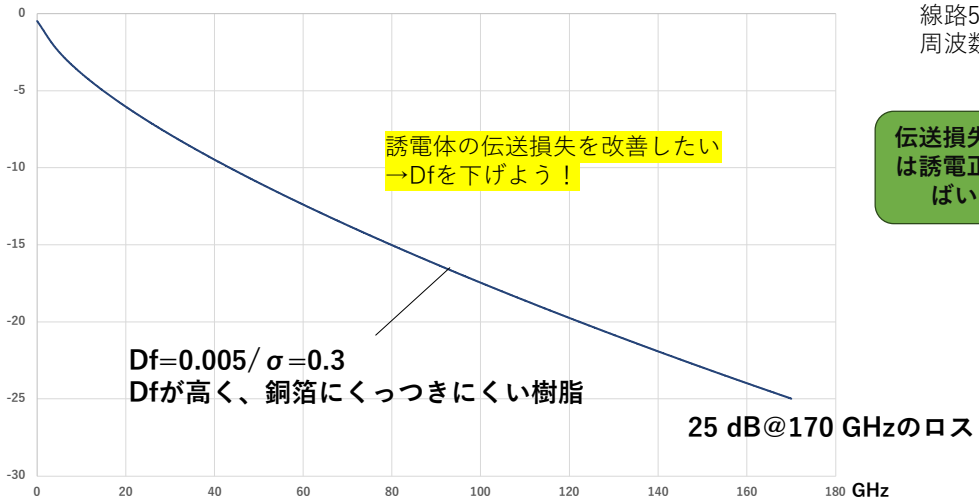
Dfもσも周波数特性を持たないとしたら伝送損失はそれぞれ半々ぐらいなんだ！

EM labs

15

合計の伝送ロスについて考える

誘電率：3.5
誘電体厚み＝50um
線路50㎜
周波数：1~170GHz



伝送損失を小さくするには誘電正接を小さくすればいいんだよね？

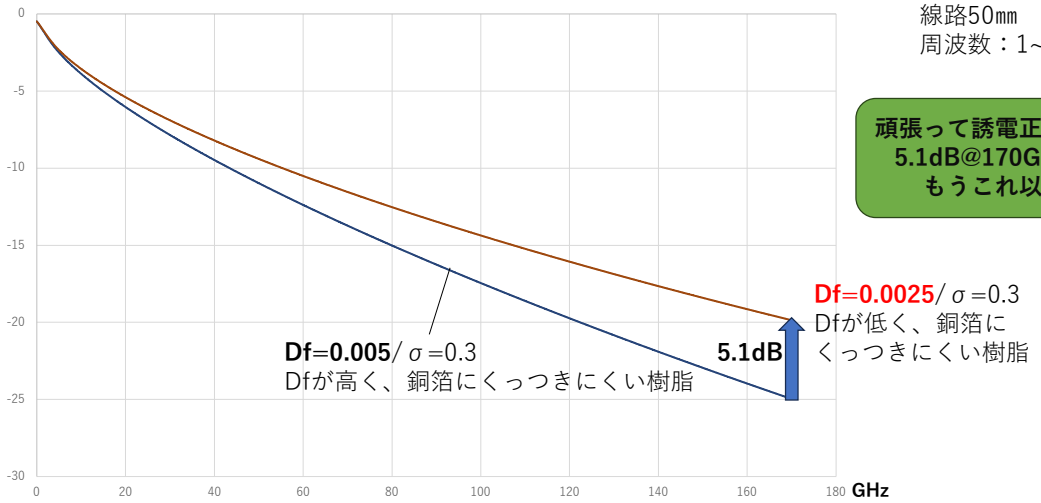
低周波クマちゃん

EM labs

16

樹脂のDfを下げて伝送ロスを減らす

誘電率：3.5
誘電体厚み＝50um
線路50㎜
周波数：1~170GHz



頑張って誘電正接を半分にして
5.1dB@170GHz改善した！
もうこれ以上は無理？

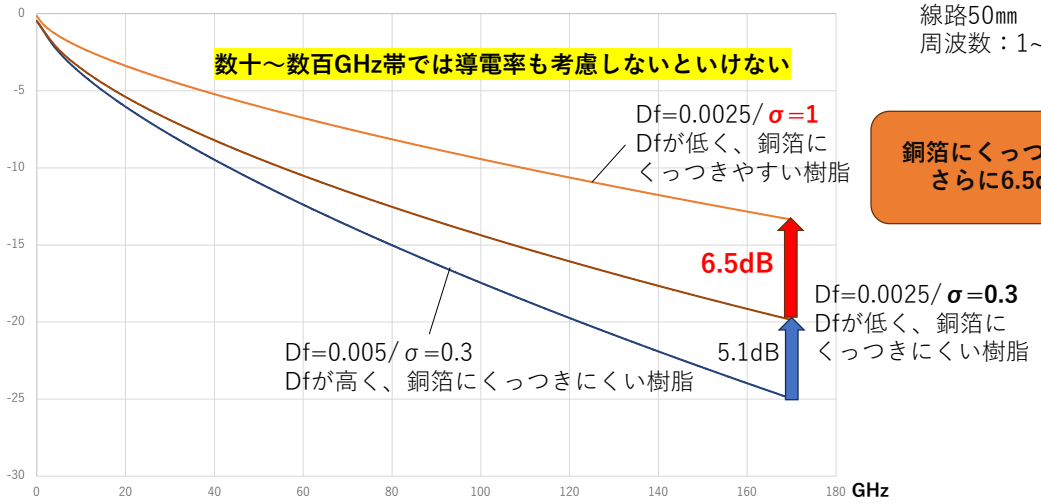
数GHz帯ではDfを減らすことに注力されていた。

EM labs

17

銅箔の粗度を下げれば伝送ロスが減る！

誘電率：3.5
誘電体厚み＝50um
線路50㎜
周波数：1~170GHz



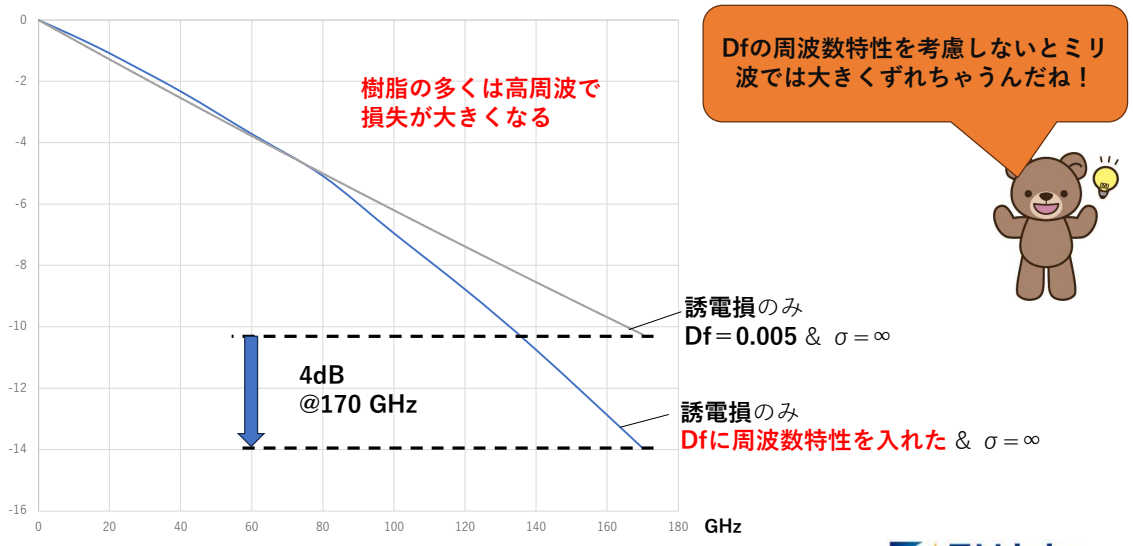
銅箔にくっつきやすくしたら
さらに6.5dB改善した！

ミリ波帯では樹脂のDfを下げるだけではなく粗度の低い銅にくっつくことも重要

EM labs

18

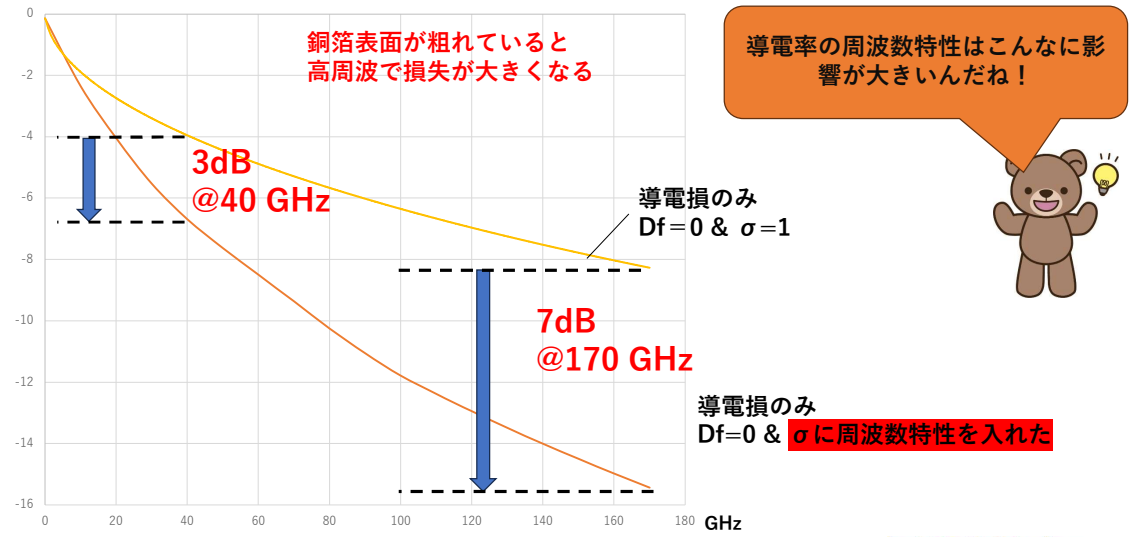
誘電損の周波数特性を考慮すると



EM labs

19

導電損の周波数特性はとても大事: 20 GHzを超えたら要注意



EM labs

20

ここまでの結論

ミリ波用基板の伝送損失を小さくするためには

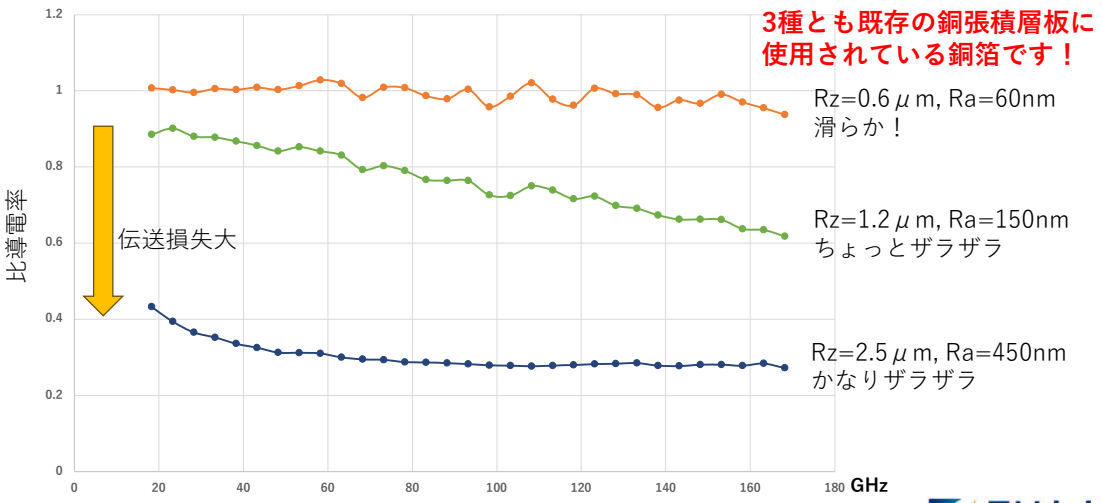
使用する周波数帯で**誘電率**と**導電率**の両方の評価が必要！

EM labs

21

EMラボの導電率測定は何がすごい？

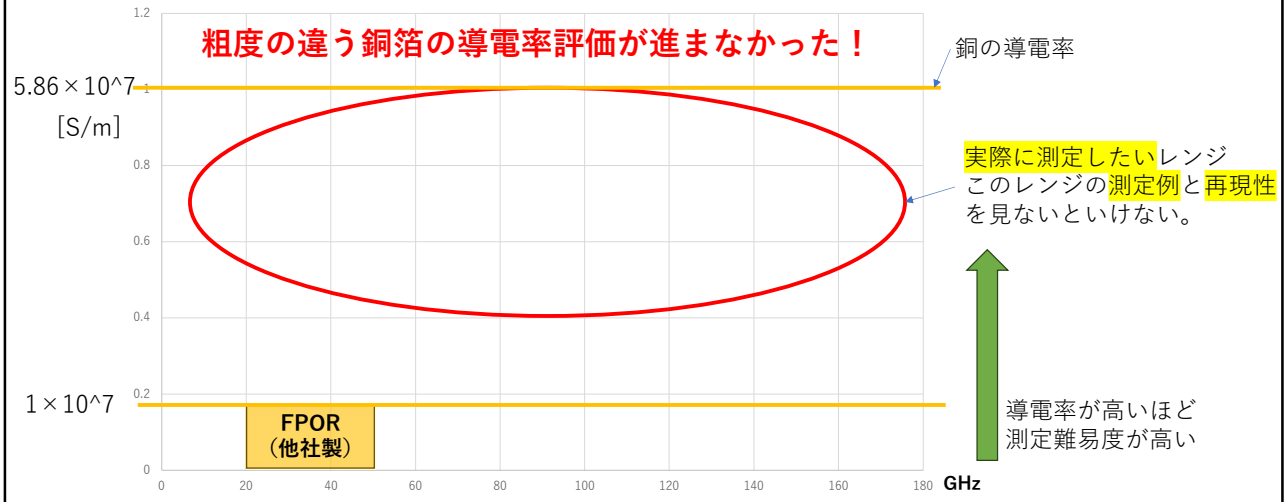
銅箔の粗度が導電率に与える影響がはっきり見える



EM labs

22

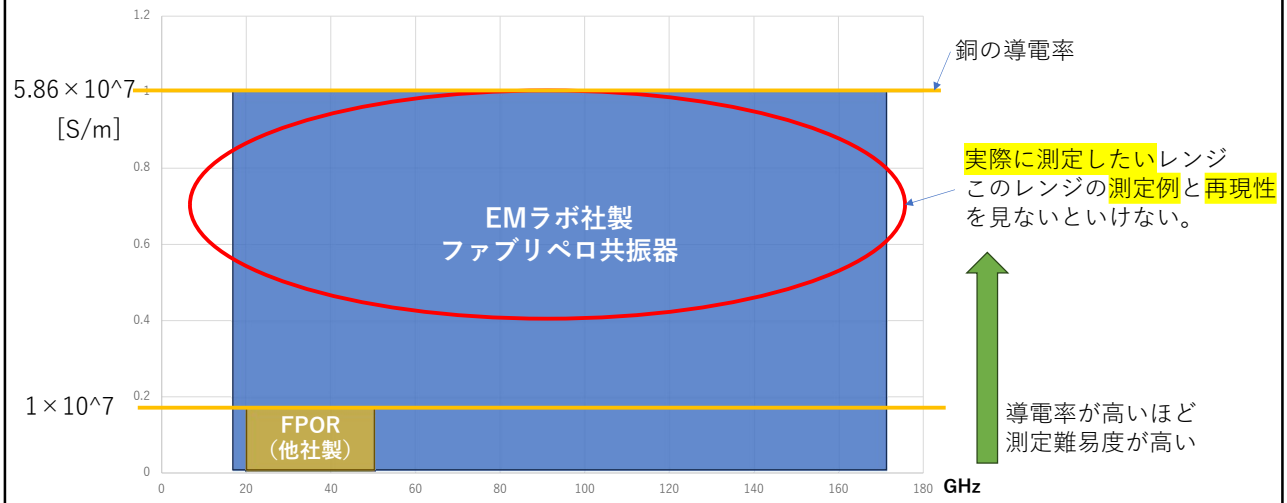
今までの導電率測定装置の測定レンジ



EM labs

23

EMラボの導電率測定レンジ



EM labs

24

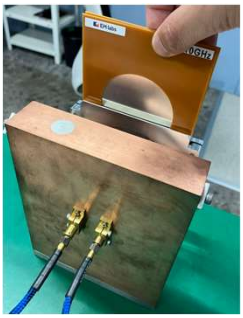
しかも測定はかんたん高速！

EMラボのファブリペロ共振器なら・・・

試料を

板で挟み

共振器に挿入



20-110 GHz 約2分/1試料
110-170 GHz 約2分/1試料

後は測定開始ボタンを押すだけ！

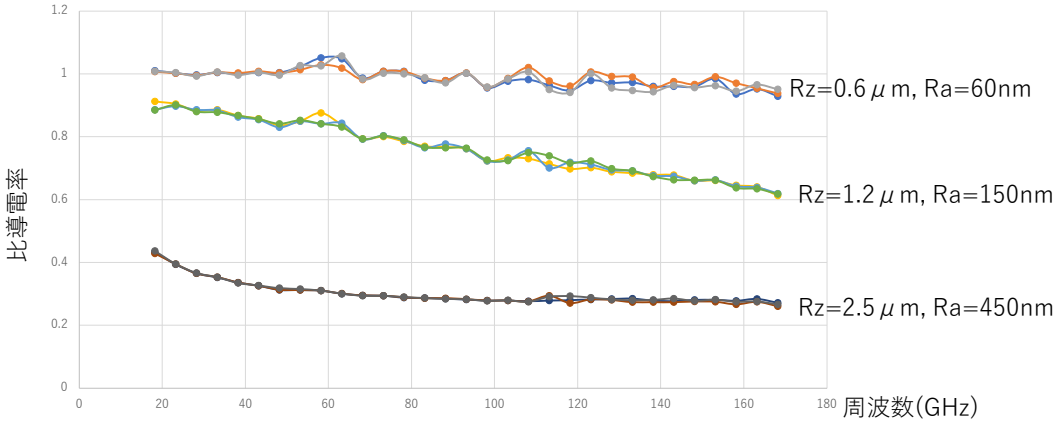
- **面倒なエッチング不要！**
- **キャリブレーション不要！**
- **銅箔でも銅板でも測定可能！**
- **誘電体の有無にかかわらす測定可能！**

EM labs

25

複数回測定しても驚くほどの安定度

3種の銅箔をを3回ずつ測定

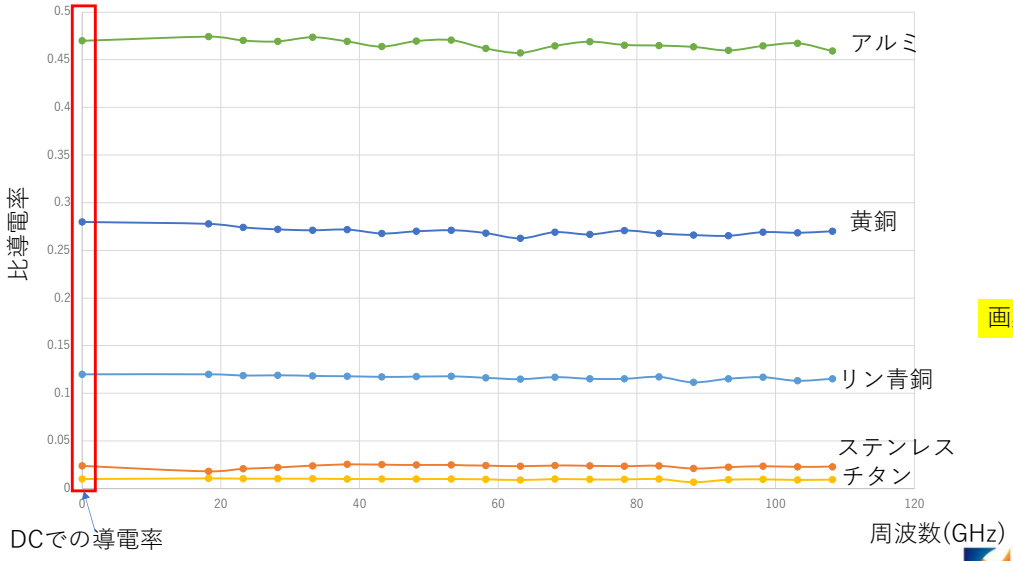


誰が測定しても、いつ測定しても同じ値！

EM labs

26

粗していない異種金属は表面導電率が周波数で変わらない



画期的なデータ！

EM labs

27

ミリ波誘電率測定ソリューションは盤石

25-330 GHz 広帯域評価にはファブリペロー共振器

BB(25-110GHz), D(110 -170 GHz), G(140 -220 GHz), J(220- 330 GHz)

- 2.5 GHzおきに1点4秒で測定
- 簡単で高精度
- 面内異方性評価可能

Broad Band

Banded

10-80 GHz 多サンプルの評価にはスプリットシリンダ共振器

10, 20, 24, 28, 35, 40, 50, 60, 80 GHz

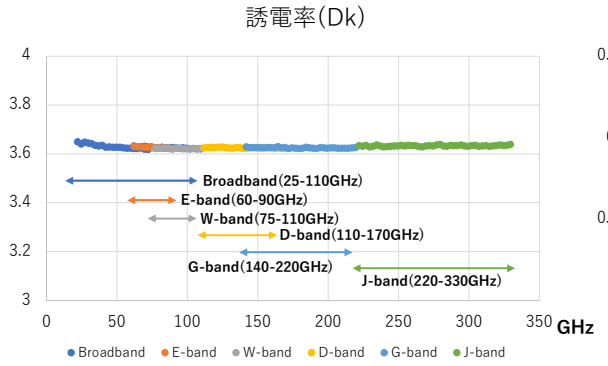
- 1サンプル15秒（スクリーニングなどに最適）
- 簡単で高精度
- 温度特性・温湿度特性評価可能

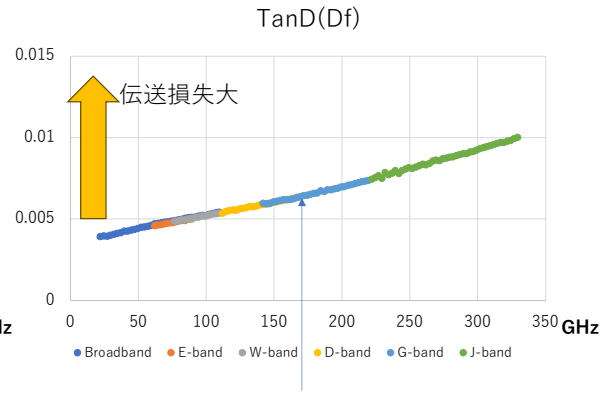
EM labs

28

Dfは周波数依存性が高い

試料：MPI
厚み：50um



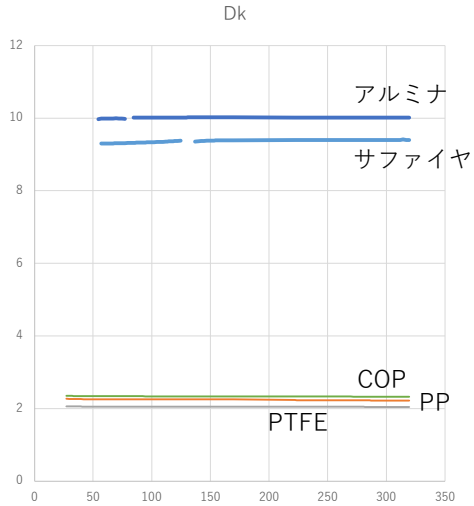


170GHzで使用する材料は170GHzでの
測定が必要

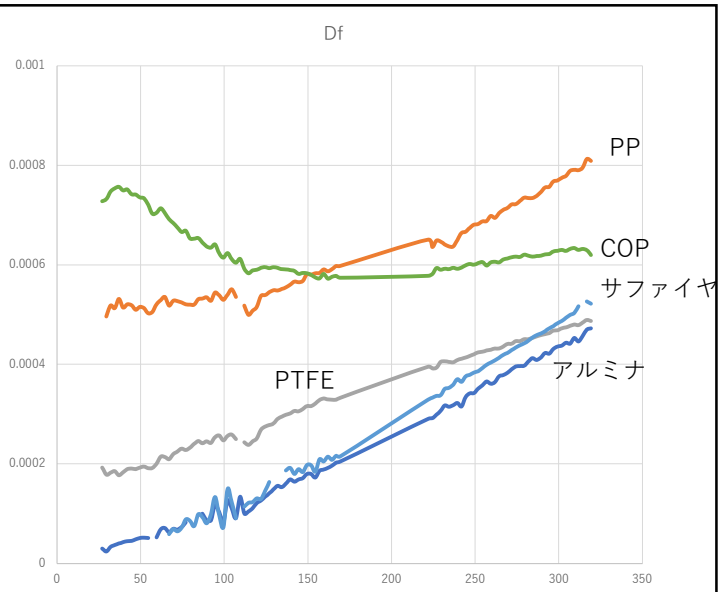
EM labs

29

Dfの傾きいろいろ



Dkの周波数特性はほとんどない



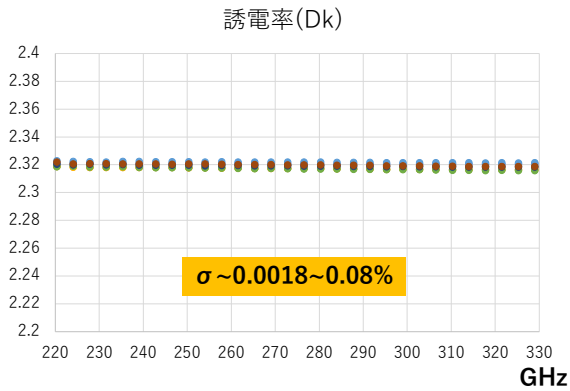
低周波ではアルミナとサファイヤが圧倒的低損失だが、
高周波ではPTFEと変わらない
→低周波で使えなかった樹脂が高周波では使えるかも？

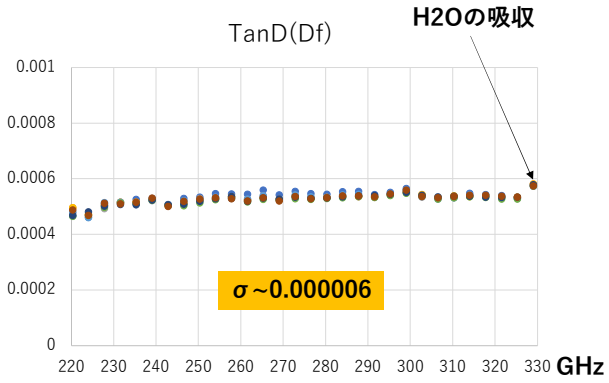
EM labs

30

誘電率測定の再現性: 300 GHzでも驚きの再現性

同じ試料(PP)を8回測定した
試料設置⇒測定⇒試料裏返し⇒測定⇒試料裏返し⇒測定⇒・・・





0.0006以下のtanδが安定して測定できている

再現性の評価も低誘電正接試料で！

EM labs

31

前半まとめ

- **20GHz以上のアンテナや伝送路の設計はDfとσ両方の検討が不可欠。**
- **ミリ波での“いい素材“は「Dfが低く」、「σの高い銅箔に接着できる」**
- **ミリ波での“いい銅箔“は「σが高いまま接着しやすい」**
- **ミリ波誘電率は高精度測定できます。**
- **ミリ波の導電率の高精度測定が可能になりました: 銅箔粗度の影響が見える！**
- **ミリ波の導電率が「誰でも」「簡単に」測定できるようになります。**

ブース「J-18」にて実機展示中！
外部環境によらず安定して測定できます！

EM labs

32

アジェンダ

- **はじめに**

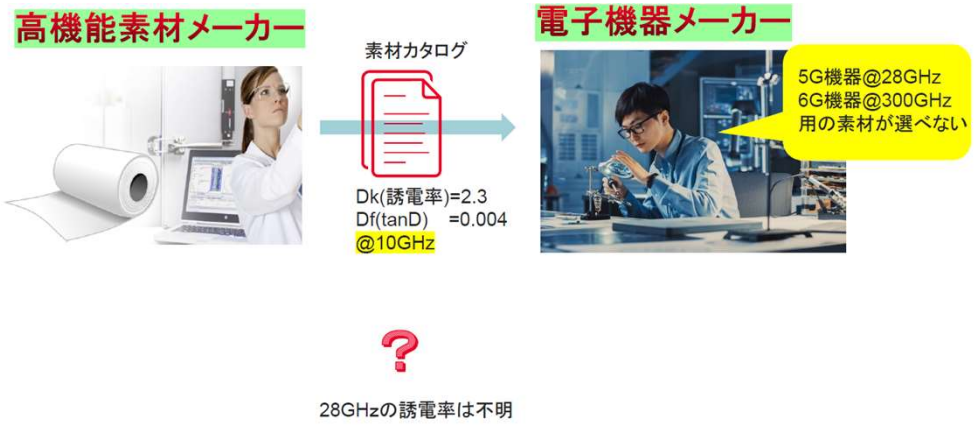
- **基板の損失改善を深堀**
  - 基板の伝送損失と誘電率・導電率
  - ミリ波基板材料の導電率測定
  - ミリ波基板材料の誘電率測定

- **誘電率測定いろいろ**
  - 機器メーカー様の悩み
  - 超低損失セラミックスのミリ波誘電率
  - メタサーフェス
  - 誘電率温湿度特性
  - 液体のミリ波誘電率
  - 粘着シートのミリ波誘電率

EM labs

33

電子機器メーカーの悩み：カタログの誘電率データが不十分

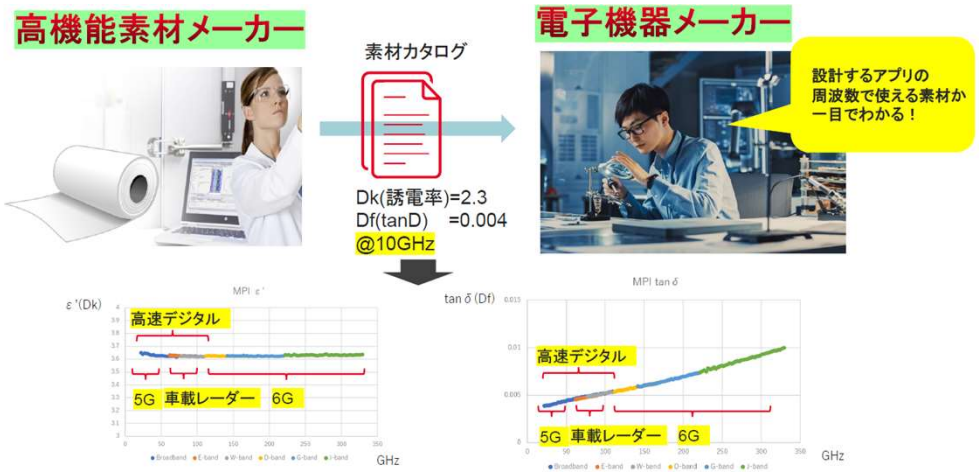


ユーザー自ら評価しなければならない。。。

EM labs

34

カタログに誘電率の周波数特性が載っていたら？

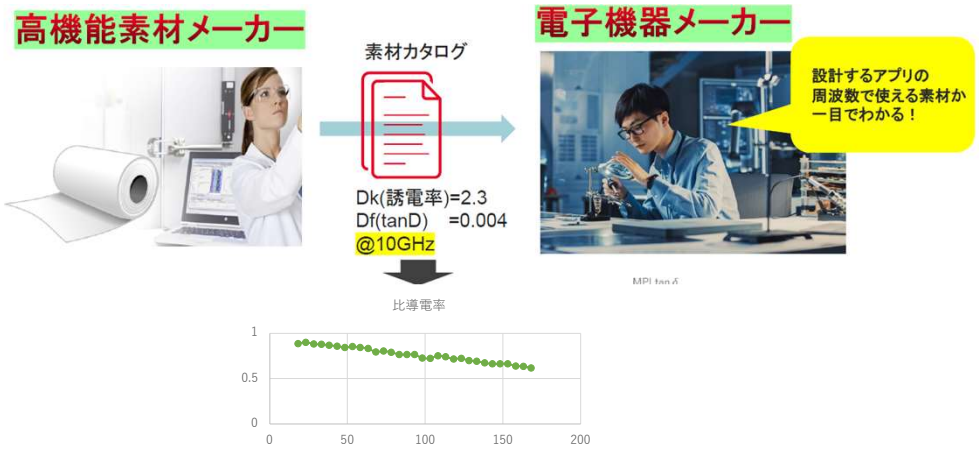


ユーザーは使用する周波数での誘電特性をすぐに知れる！

EM labs

35

さらに銅箔の導電率周波数特性が載っていれば？



ユーザーはカタログデータをもとに必要な材料が選べる！

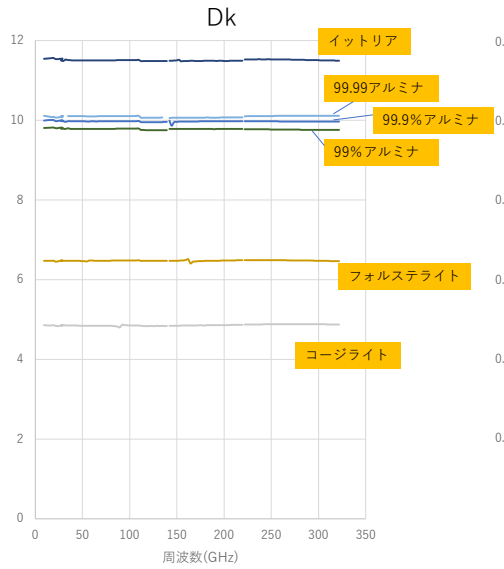
データは高機能素材の重要な差別化要因！

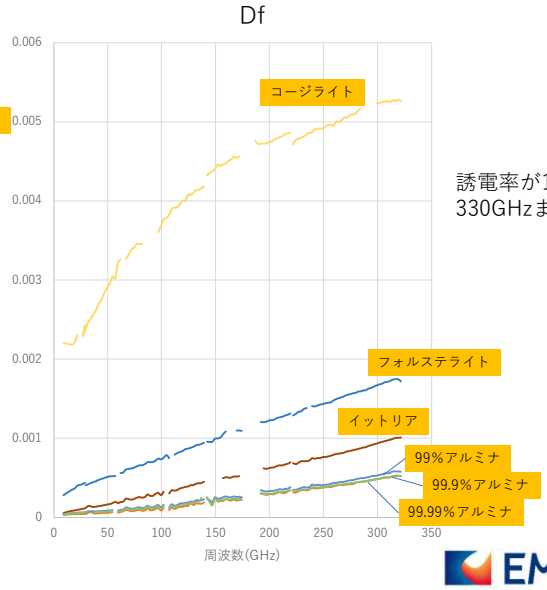
EM labs

36

西村陶業様ご提供
Mail:npc-kei@nishimuratougyou.co.jp

スプリットシリンダー・ファブリペローでのセラミック測定例





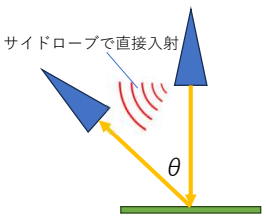
誘電率が10を超えても
330GHzまで測定可能！

EM labs

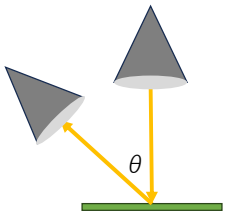
37

フリースペース装置によるメタサーフェス測定

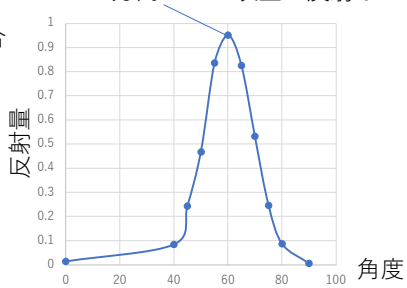
ホーンアンテナの場合



EMラボの誘電体レンズアンテナの場合



60°の方向に95%以上の反射！



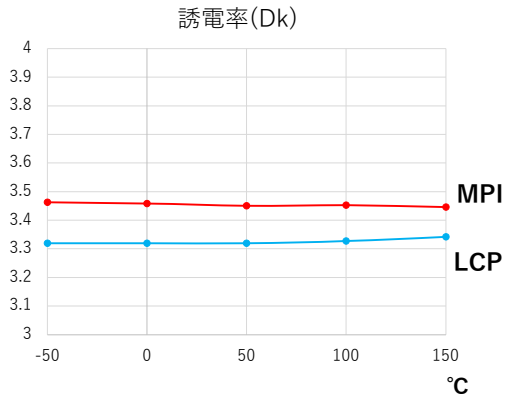
サイドローブが-60dB以下なので
直接入射しないため、正確な測定が可能！

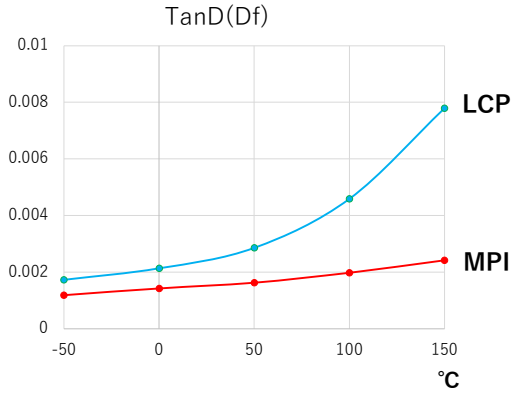
角度に対する絶対値が知りたい場合はEMラボの誘電体レンズアンテナ！

EM labs

38

スプリットシリンダーでの温度依存性測定例@40GHz





LCPは温度が上がると極端にTanDが悪化する

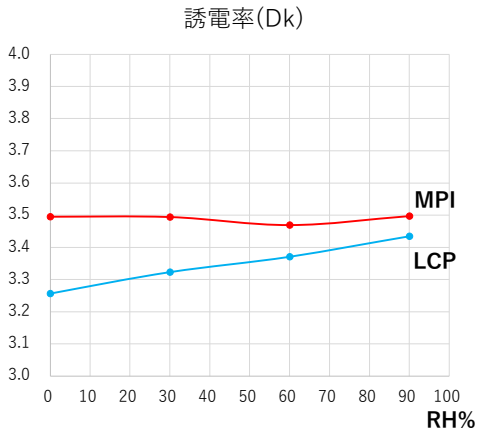
今日は暑いから電波が飛びにくい！？となる可能性がある。

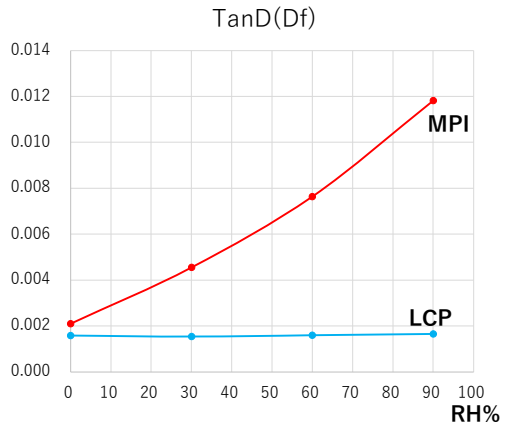
EM labs

39

スプリットシリンダーでの湿度依存性測定例 @0, 30, 60, 90%RH @室温 @28GHz

0%は絶乾直後





LCPは湿度が上がると誘電率が上がる

MPIは湿度が上がると急激にTanDが悪化する

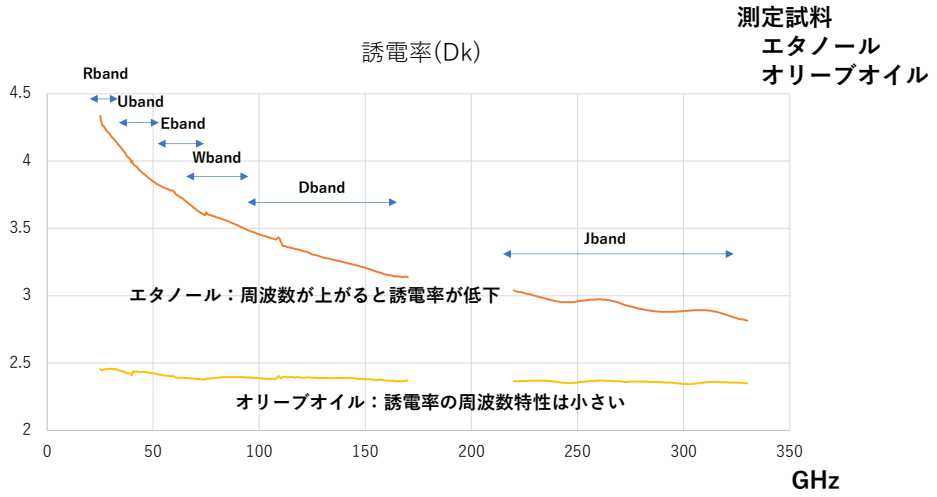
今日は湿度が高いから電波が飛びにくい！？となる可能性がある。

温度と湿度の両方の特性を確認したほうが良い

EM labs

40

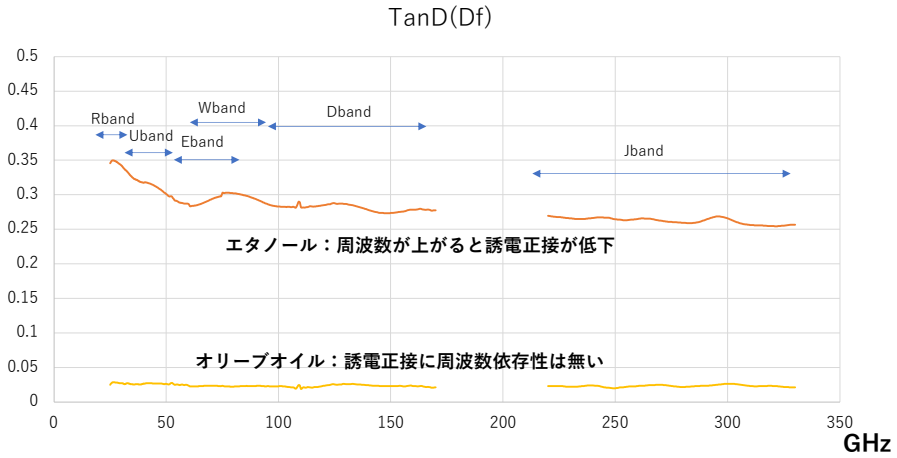
フリースペース装置での液体の測定例：誘電率



EM labs

41

フリースペース装置での液体の測定例：誘電正接



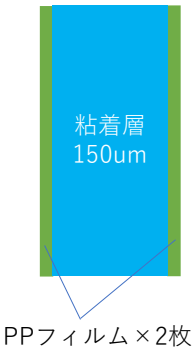
液体であっても、正しい測定手順とノウハウによってきれいに測定可能

EM labs

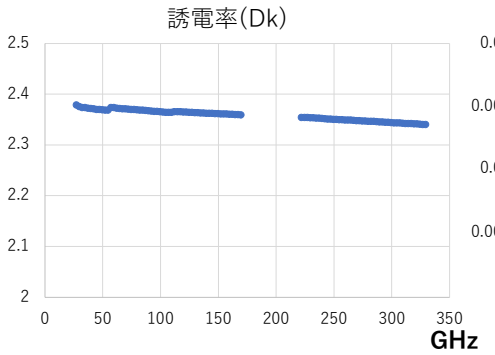
42

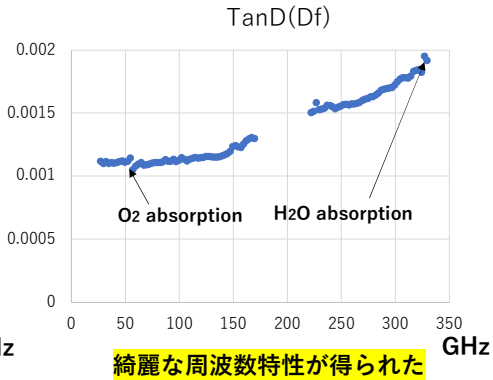
粘着剤の測定例

王子HD様ご提供



自立できない粘着剤：PPフィルムに挟んだ状態で測定　　PP単体でも測定
得られた2つの値から粘着剤単体の誘電率を算出





綺麗な周波数特性が得られた

EM labs

43

まとめ

- 20 GHz以上のアンテナや伝送路の設計は誘電率・が不可欠。
- ミリ波の導電率測定が「誰でも」「簡単に」測定できるようになります。
- 材料カタログに周波数特性を載せることは大きなアドバンテージです。
- 330 GHzまでフィルムはもちろん液体、粘着膜など多様な測定が可能です。
- EMラボは新たな材料測定の課題にチャレンジし続けています！

メーカーの「測れます！」をうのみにすると危ないよ、自分の測定したい試料を
しっかり測定できるという測定例や再現性を確認しないとね！
Appendixにチェックシートがあるから活用してみてね！

実測の簡単さを是非ブースにてご確認ください！
理論と併せてご説明します！「J-18」

EM labs

44

Appendix

EM labs

45

EM labs

46

チェックシートとしてお使いいただけます

誘電率測定装置・測定サービス選択で確認すべきこと

□測定例
低誘電正接品かつ薄い試料の周波数特性を確認。　PTFE50umなど
→どれくらいの乱れがあるか？
※縦軸スケールに注意。スケールが大きいと乱れが見えなくなる。

□再現性
低誘電正接試料の再現性を確認。　PTFE50umなど
→**取外し⇔取付け⇔測定**を繰り返した結果を確認する。
※取付けたまま測定ボタンを押すだけでは測定再現性はわからない。
※縦軸スケールに注意。スケールが大きいとばらつきが確認できない。

□治具間の相関
同じ試料を違う治具で測定した結果を参考にする。
→各社様々な治具を所有しているので相関は確認できる。
※縦軸スケールに注意。スケールが大きいと差分が確認できない。

□**実際に自身で測定** → 初めてでも測れる＝安定している
委託測定の際は立ち会う。
→技術がなくても測定できるか確認する
→目の前で測定値を確認。複数回測定すれば再現性も確認できる。

□測定時間が短い
測定時間が短いと温度に敏感な治具やネットワークアナライザの時間ドリフトを軽減できる。
大量の測定をする際も効率的。
EMラボの治具なら　スプリットシリンダー：15秒/試料　空洞共振器：30秒/試料
ファブリペロー：3分/試料(全周波数)　フリースペース：1分/試料

EM labs

47

チェックシートとしてお使いいただけます

導電率測定装置・測定サービス選択で確認すべきこと

□測定例
高導電率の周波数特性を確認。　Raの小さい銅箔・銅板など
→どれくらいの乱れがあるか？
※縦軸スケールに注意。スケールが大きいと乱れが見えなくなる。

□再現性
低誘電正接試料の再現性を確認。　Raの小さい銅箔・銅板など
→**取外し⇔取付け⇔測定**を繰り返した結果を確認する。
※取付けたまま測定ボタンを押すだけでは測定再現性はわからない。
※縦軸スケールに注意。スケールが大きいとばらつきが確認できない。

□**実際に自身で測定** → 初めてでも測れる＝安定している
委託測定の際は立ち会う。
→技術がなくても測定できるか確認する
→目の前で測定値を確認。複数回測定すれば再現性も確認できる。

□測定時間が短い
測定時間が短いと温度に敏感な治具やネットワークアナライザの時間ドリフトを軽減できる。
大量の測定をする際も効率的。
EMラボのファブリペロなら、20~110GHz：2分　110~170GHz：1分半

EM labs

48