

EMラボ株式会社

(ブース番号：K-15)

ミリ波帯 誘電率・導電率測定の最前線 ～ 信頼できる材料測定、できていますか？ ～

MWE2025 企業セミナー

山本修也

2025/11/27



本セミナーを聞いたら分かること

- ・ ミリ波帯において誘電率や導電率の測定が重要な理由
- ・ 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
- ・ 最新製品について
 - ・ ファブリペロー共振器での液体測定（～330GHz）
 - ・ 導電率スプリットシリンダ共振器
 - ・ フリースペース 材料測定ソフトウェア
- ・ 測定装置・測定サービスを選ぶ際のポイント5つ

用語

誘電率 = 比誘電率 = 誘電率実部 = $\epsilon' = Dk$
 誘電正接 = $\tan \delta =$ 誘電損失 = Df
 導電率 = 比導電率 = σ
 ※軟銅($5.8 \times 10^7 \text{S/m}$)を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。

測定理論についての紹介は最低限です
 どうやって測定するかよりも、なぜ測定すべきか、何ができるか、を中心にお話します



目次

- Chapter 1 ミリ波 材料測定的重要性とEMラボからのメッセージ
- Chapter 2 どんな素材メーカーが選ばれるか？
- Chapter 3 誘電率測定ソリューション
- Chapter 4 導電率が伝送特性に及ぼす影響
- Chapter 5 導電率測定ソリューション
- Chapter 6 測定装置・測定サービスを選ぶ際のポイント5つ



目次

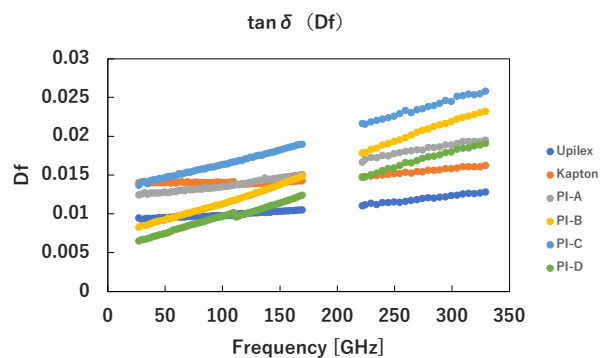
- Chapter 1 ミリ波 材料測定的重要性とEMラボからのメッセージ
- Chapter 2 どんな素材メーカーが選ばれるか？
- Chapter 3 誘電率測定ソリューション
- Chapter 4 導電率が伝送特性に及ぼす影響
- Chapter 5 導電率測定ソリューション
- Chapter 6 測定装置・測定サービスを選ぶ際のポイント5つ





ミリ波で素材の誘電率を測定してみると・・・？

「ポリイミド」に分類される素材6種を25GHz~330GHzで測定



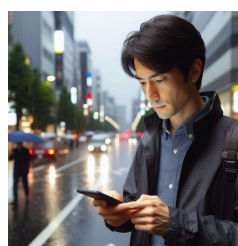
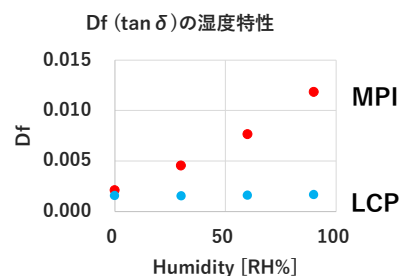
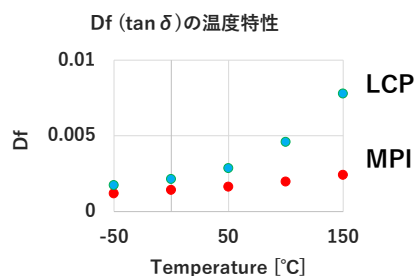
誘電率（特にDf）は周波数によって値が変わる！

東京科学大学 物質理工学院
安藤慎治研究室との共同研究

測定例詳細
<https://www.emlabs.jp/10-2pi01>

さらに、温度や湿度でも変わってくる

LCP : Liquid Crystal Polymer
MPI : Modified polyimide



KEYSIGHT
TECHNOLOGIES
Solution Partner

EM labs

誘電率は「点」ではありません

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(f, T, H)$$

(frequency, temperature, humidity)

周波数、温度、湿度によって誘電率は変わります
その変わり方は試料によって異なります

「点」でもらった誘電率は役に立ちません
素材を使用する周波数での誘電率が必要です
温度・湿度環境による誘電率変化の情報も必要です

KEYSIGHT
TECHNOLOGIES
Solution Partner

EM labs

目次

- Chapter 1 ミリ波 材料測定の重要性とEMラボからのメッセージ
- Chapter 2 **どんな素材メーカーが選ばれるか？**
- Chapter 3 誘電率測定ソリューション
- Chapter 4 導電率が伝送特性に及ぼす影響
- Chapter 5 導電率測定ソリューション
- Chapter 6 測定装置・測定サービスを選ぶ際のポイント5つ

使いたい周波数で測定された誘電率データがない・・・

高性能素材メーカー



素材データシート



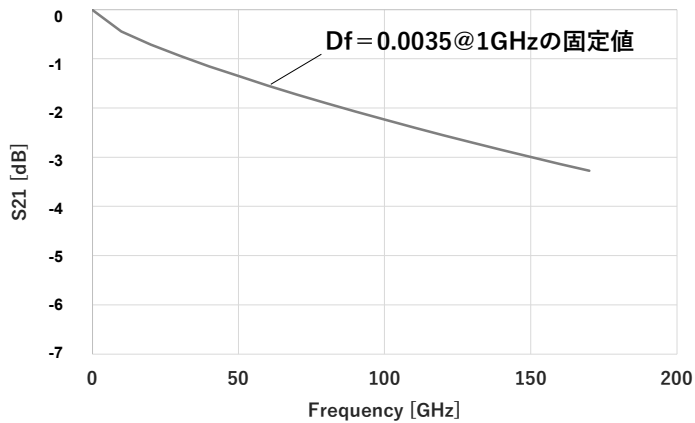
$D_k (\epsilon'') = 3.5$
 $D_f (\tan \delta) = 0.0035$
@1GHz

電子機器メーカー

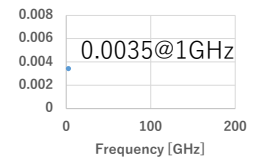



170GHzで動作する
製品なんだけど・・・

Dfの周波数・湿度特性の影響をシミュレーション



MSLシミュレーション
誘電体厚み：50um
線路：20mm
Dk：3.5

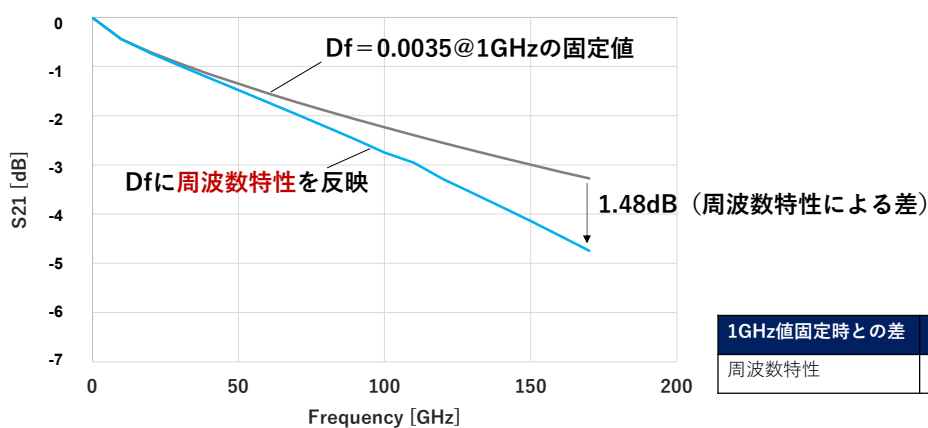


ウチの製品、170GHzで動作させるんだけど、
あの人（）から貰った1GHzのデータで設計するしかないか・・・

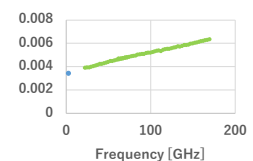
KEYSIGHT
TECHNOLOGIES
Solution Partner

EM labs

Dfの周波数・湿度特性の影響をシミュレーション



MSLシミュレーション
誘電体厚み：50um
線路：20mm
Dk：3.5
Df：以下周波数特性



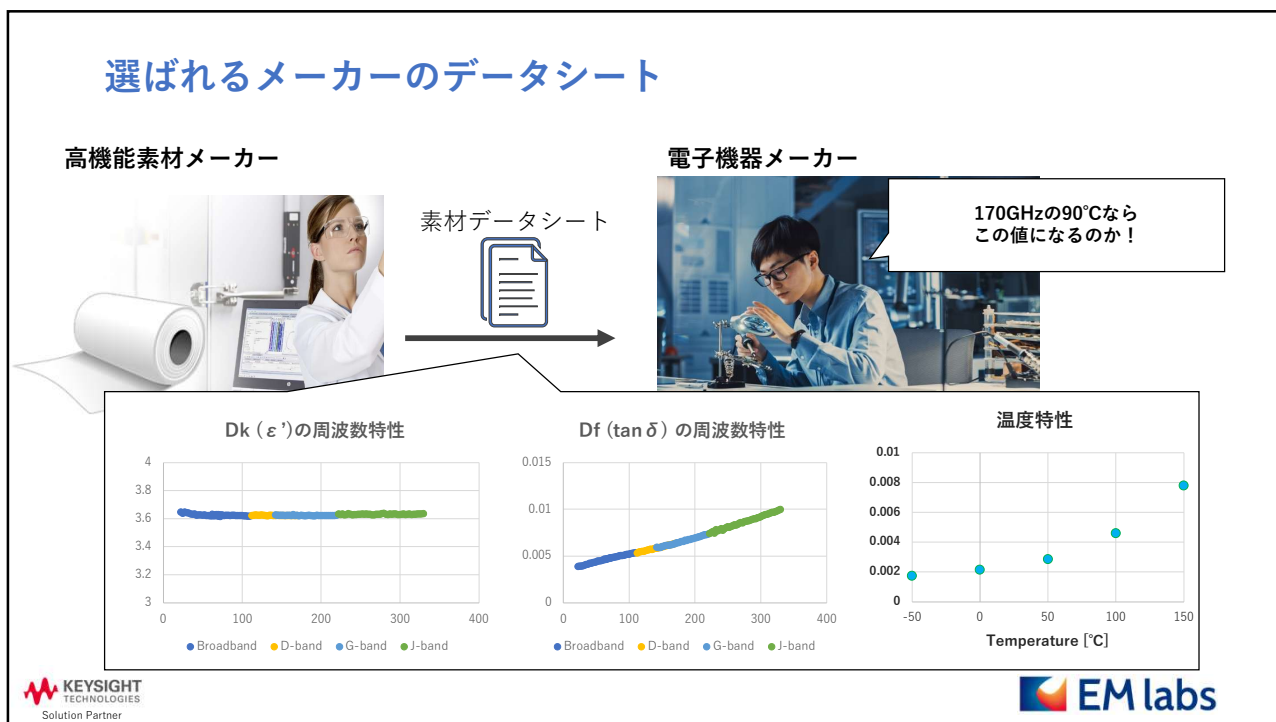
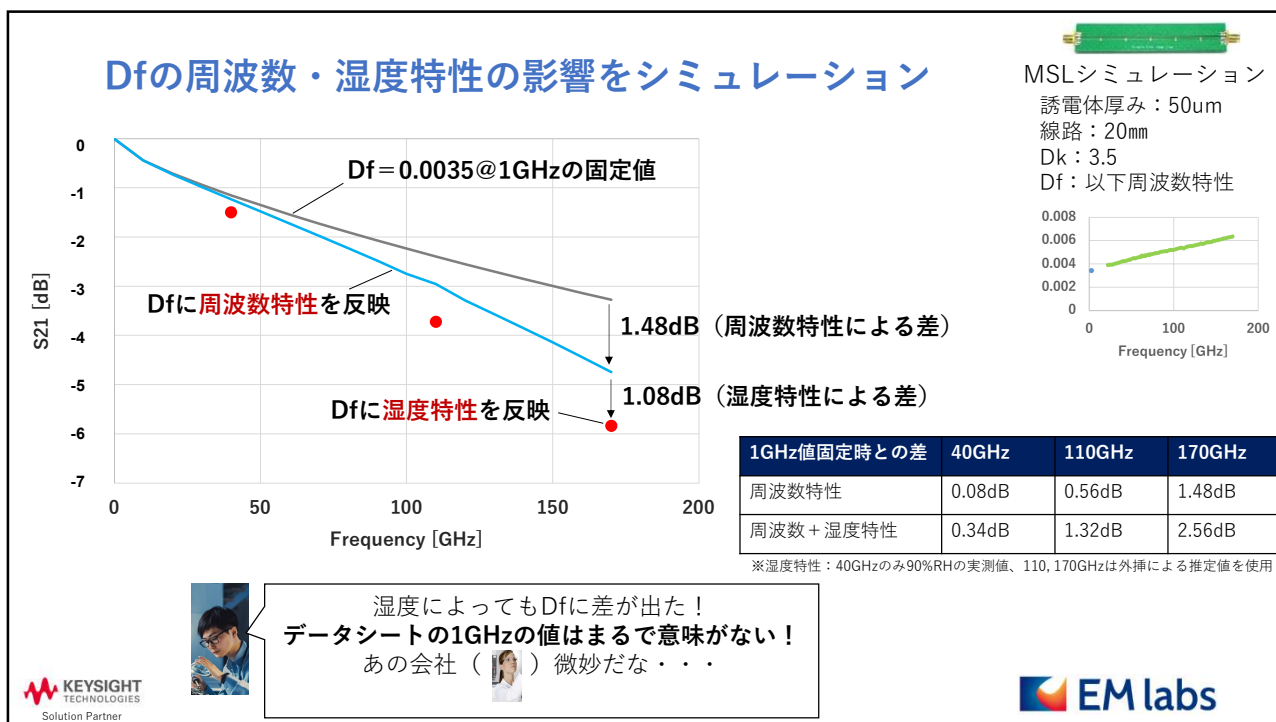
1GHz値固定時との差	40GHz	110GHz	170GHz
周波数特性	0.08dB	0.56dB	1.48dB



気になって170GHzまで誘電率を測定してみたら、全然値が違うぞ？！
性能が予想通りじゃなかったのはDfが違ったせいかな・・・

KEYSIGHT
TECHNOLOGIES
Solution Partner

EM labs



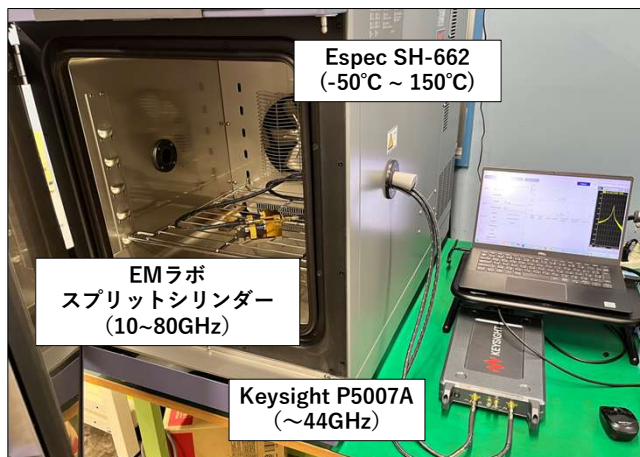
目次

- Chapter 1 ミリ波 材料測定の重要性とEMラボからのメッセージ
- Chapter 2 どんな素材メーカーが選ばれるか？
- **Chapter 3 誘電率測定ソリューション**
- Chapter 4 導電率が伝送特性に及ぼす影響
- Chapter 5 導電率測定ソリューション
- Chapter 6 測定装置・測定サービスを選ぶ際のポイント5つ

EMラボの製品群と対応する市場 ～誘電率測定～



実動作環境での性能確認に最適な評価システム



ラインナップ

温度評価対応版

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

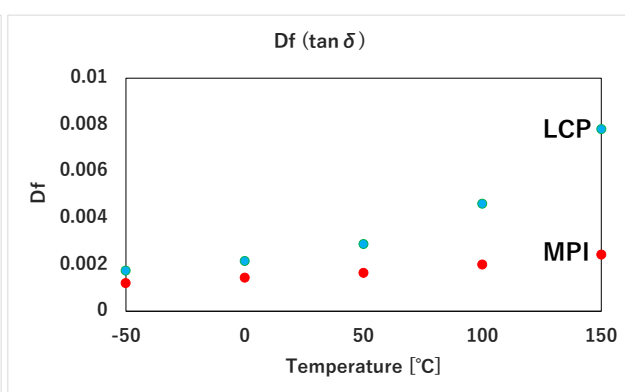
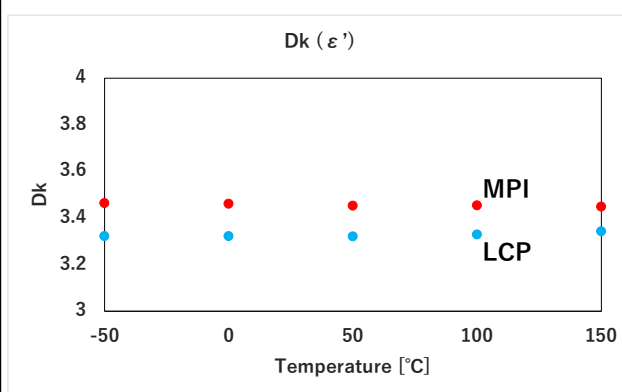
温湿度評価対応版

10, 20, 28, 40 GHz

-50°C~150°Cの範囲で評価可能
(湿度は恒温槽の仕様による)

測定例 ~温度依存性@40GHz~

LCP : Liquid Crystal Polymer
MPI : Modified polyimide

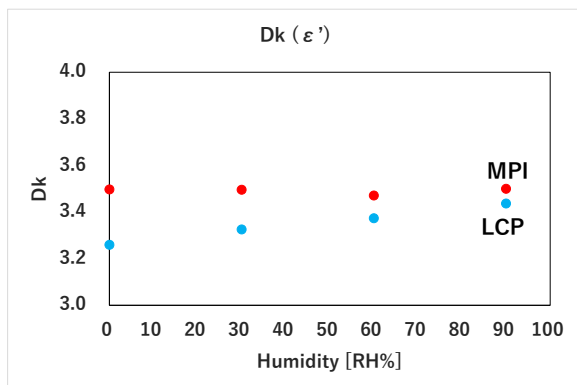


LCPは温度が上がると極端にDfが悪化

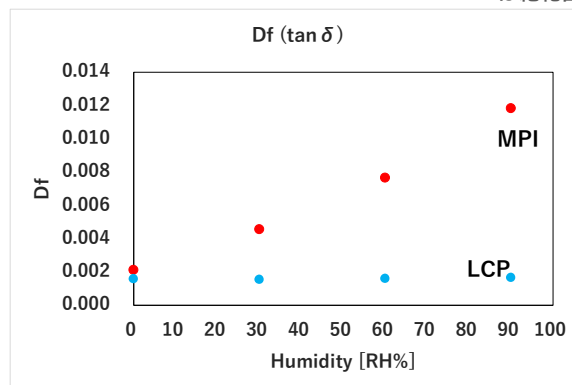
測定例 ～湿度依存性@28GHz、25°C～

LCP : Liquid Crystal Polymer
MPI : Modified polyimide

0%は絶乾直後



LCPは湿度が上がるとDkが上がる

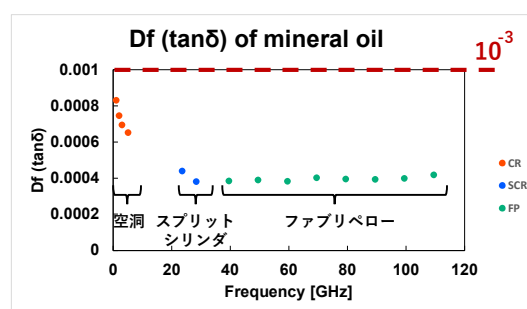
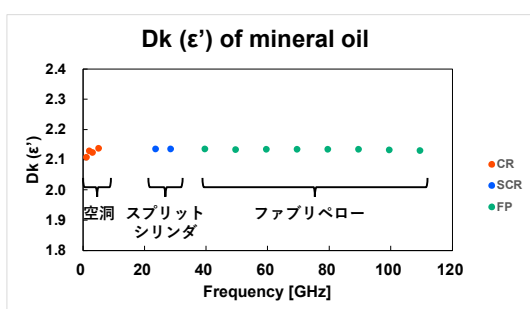


MPIは湿度が上がると急激にDfが悪化

温度と湿度の両方の特性を確認すべき



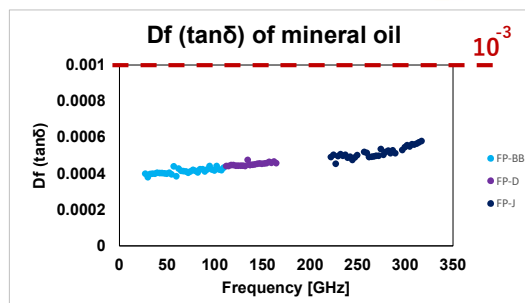
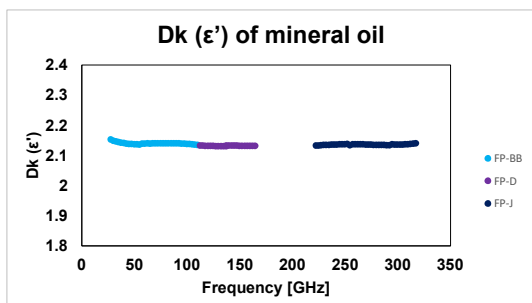
液体測定でも周波数特性を取得可能



空洞共振器・スプリットシリンダ共振器・ファブリペロー共振器を組み合わせると
広範囲の周波数特性を取得可能！



NEW ! 液体測定が330GHzまで可能に !



NEW !

ファブリペロー共振器が液体測定に対応！
対応周波数：25~330 GHz

2025年 製品販売開始！
受託測定も実施中！

AIサーバーの液体冷却用素材の評価に最適！

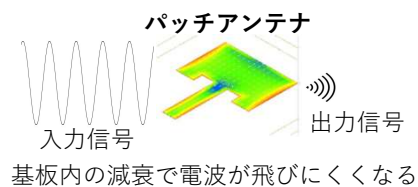


目次

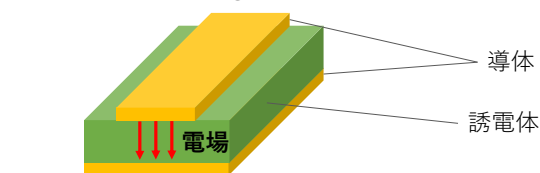
- Chapter 1 ミリ波 材料測定的重要性とEMラボからのメッセージ
- Chapter 2 どんな素材メーカーが選ばれるか？
- Chapter 3 誘電率測定ソリューション
- **Chapter 4 導電率が伝送特性に及ぼす影響**
- Chapter 5 導電率測定ソリューション
- Chapter 6 測定装置・測定サービスを選ぶ際のポイント5つ



誘電率と導電率は伝送損失を決める重要なパラメータ

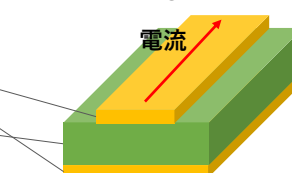


伝送損失の原因①：誘電損失



誘電体に電場が生じることで損失が生じる。
Dfが小さいほど損失が小さくなる。

伝送損失の原因②：導体損失



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。

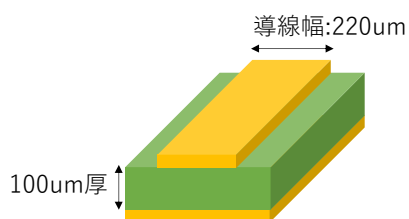
いい誘電体基板は、①Dfが小さく ② σ が大きい



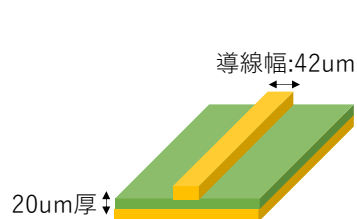
板厚が薄く・線路幅が細くなる

小型化・高周波化に伴い基板が微細化

誘電体：100 μm の時



誘電体：20 μm の時

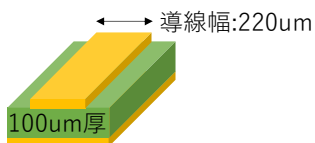


誘電体が薄くなると、導線が細くなる
導線が細くなると、(電流の通り道が小さくなって) 導体損が大きくなる

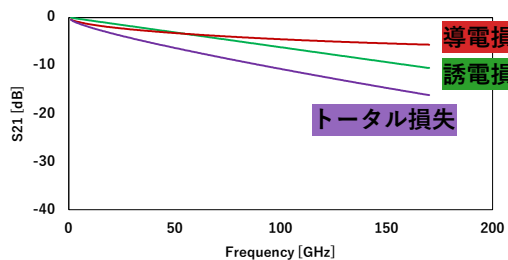


誘電損と導電損

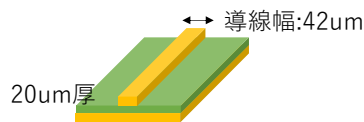
シミュレーション条件
 トータル損失: (Dk, Df, σ) = (3.5, 0.005, 0.5)
 導電損: (Dk, Df, σ) = (3.5, 0, 0.5)
 誘電損: (Dk, Df, σ) = (3.5, 0.005, ∞)



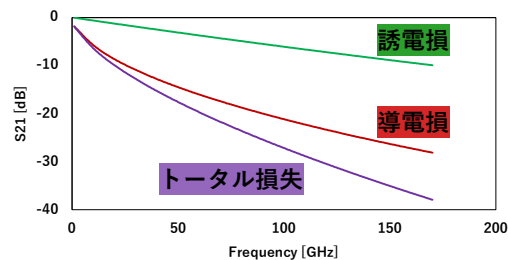
誘電体100um厚・導線幅220um



誘電損のほうが大きい



誘電体20um厚・導線幅42um

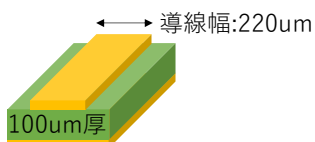


導電損が支配的

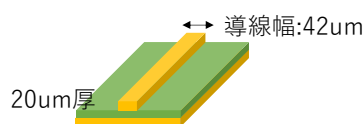
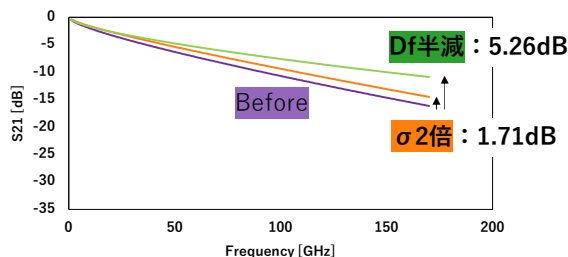
低誘電かつ誘電体が薄い場合は、導電損が支配的になるため、導電率情報は必須

Dfと σ を改善したときの効果

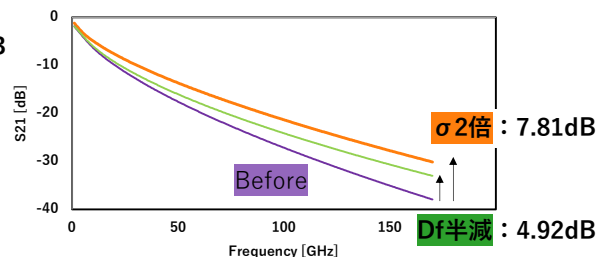
シミュレーション条件
 Before: (Dk, Df, σ) = (3.5, 0.005, 0.5)
 Df半減: (Dk, Df, σ) = (3.5, 0.0025, 0.5)
 σ 2倍: (Dk, Df, σ) = (3.5, 0.005, 1)



誘電体100um厚・導線幅220um



誘電体20um厚・導線幅42um



小型化・高周波化に伴い、誘電体は薄くなっている

導電率の良い銅箔を使う必要性が高まっている

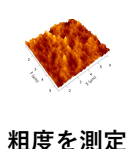
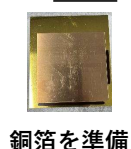
目次

- Chapter 1 ミリ波 材料測定的重要性とEMラボからのメッセージ
- Chapter 2 どんな素材メーカーが選ばれるか？
- Chapter 3 誘電率測定ソリューション
- Chapter 4 導電率が伝送特性に及ぼす影響
- **Chapter 5 導電率測定ソリューション**
- Chapter 6 測定装置・測定サービスを選ぶ際のポイント5つ

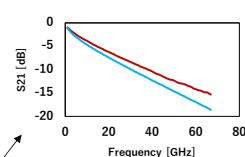


従来の測定とこれからの測定

従来

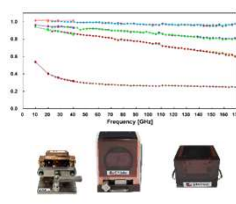
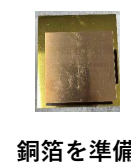


粗度から
伝送損失を
シミュレーション

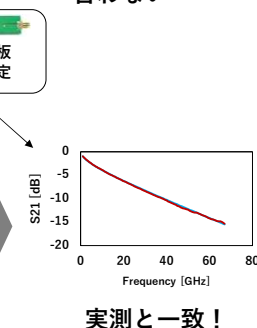


再シミュレーション
で合わせこむ・・・

これから



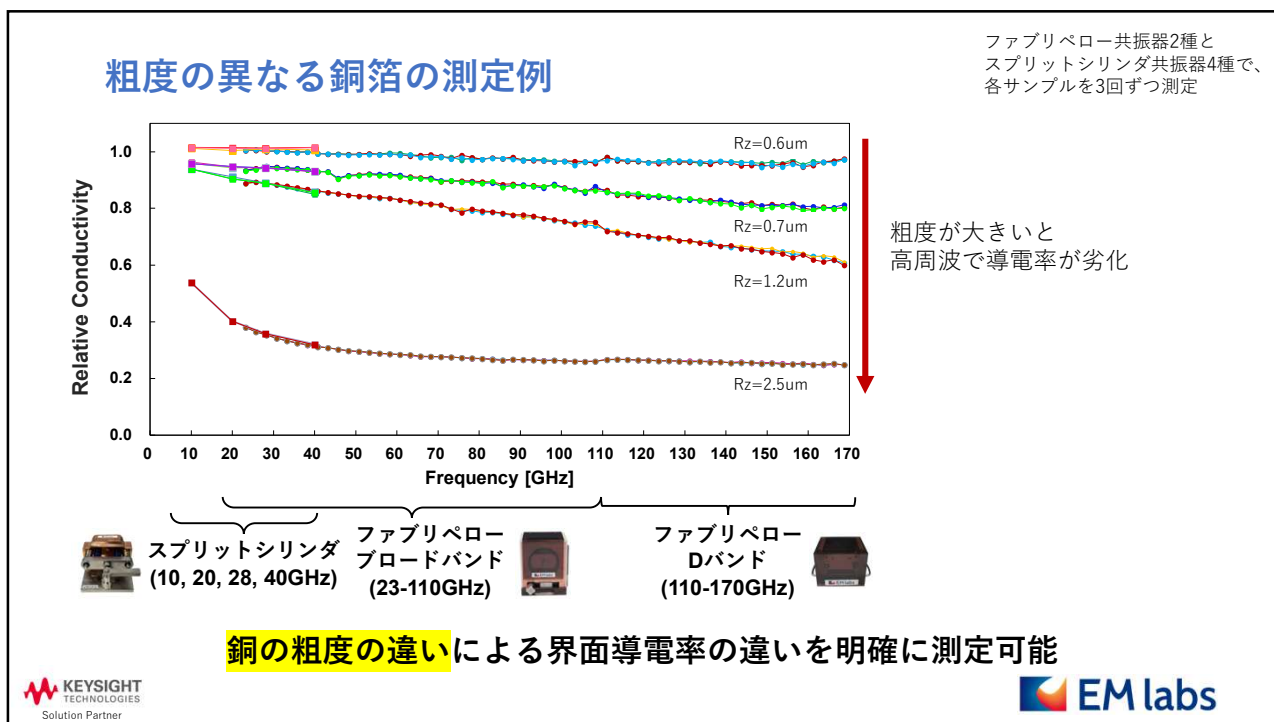
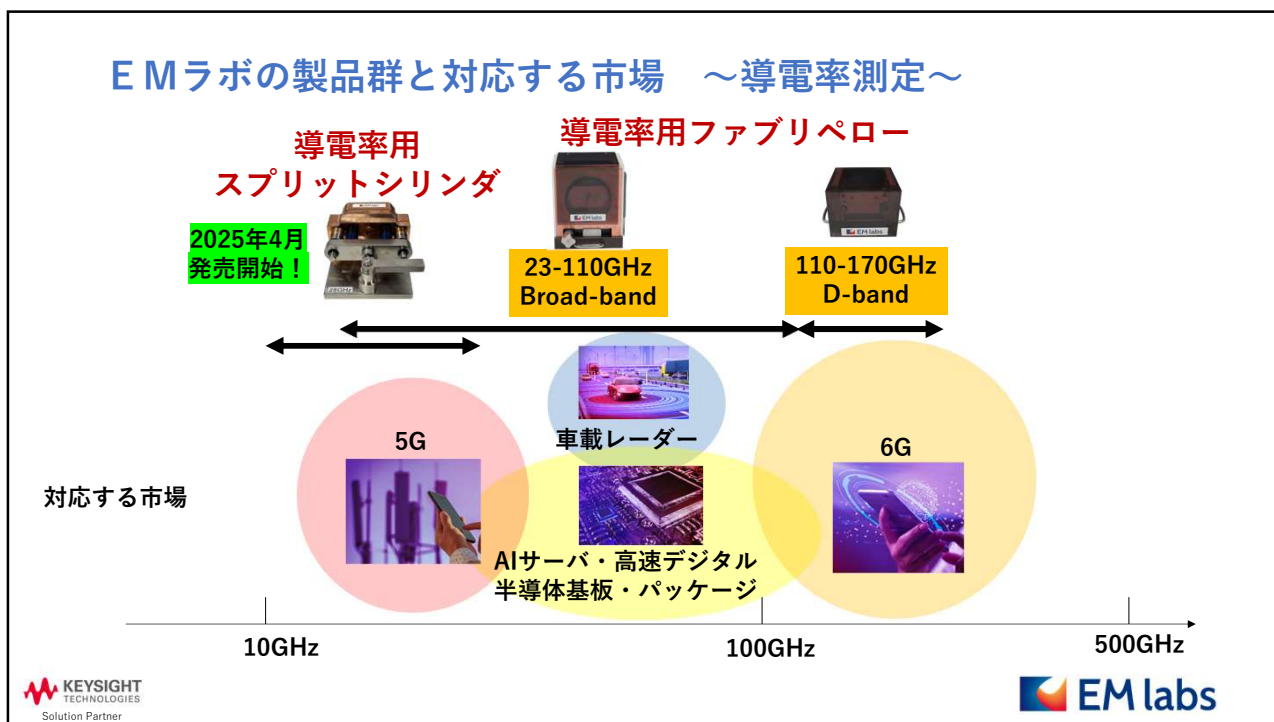
導電率から
伝送損失を
シミュレーション



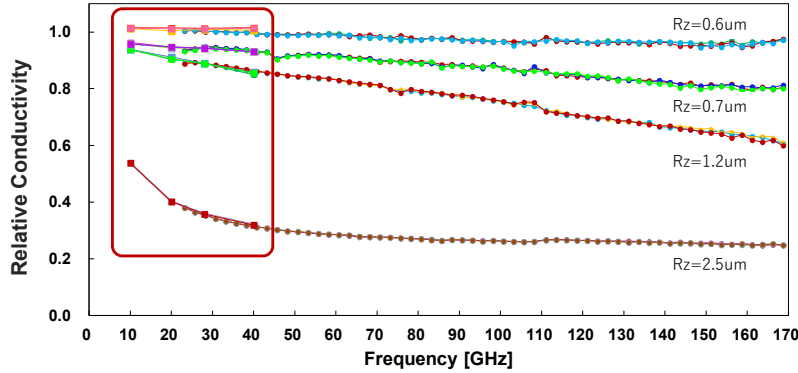
導電率測定と
シミュレーションだけの
開発サイクル
でOK！

評価用基板
作製&測定





NEW! 界面導電率を10GHzから測定可能!



ファブリペロー共振器2種と
スプリットシリンダ共振器4種で、
各サンプルを3回ずつ測定

NEW!
導電率用スプリットシリンダ
10, 20, 28, 40 GHz



2025年4月 販売開始!



スプリットシリンダ
(10, 20, 28, 40GHz)

ファブリペロー
ブロードバンド
(23-110GHz)



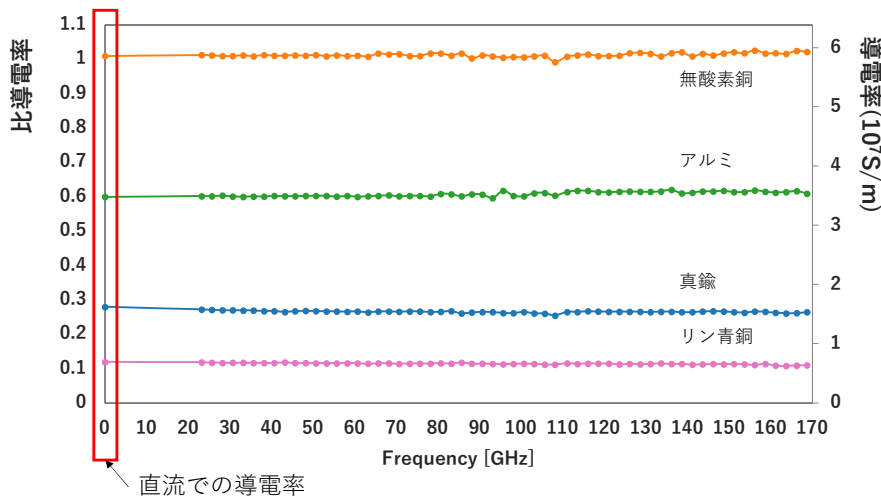
ファブリペロー
Dバンド
(110-170GHz)



装置を変えても一貫性のある結果を取得可能!



無粗化金属の実測値はDCと一致する



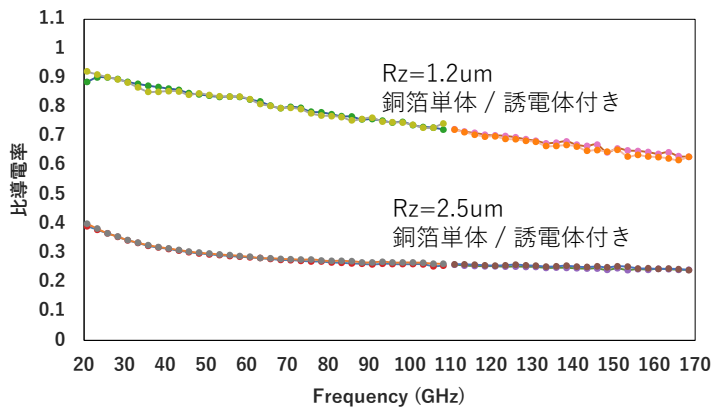
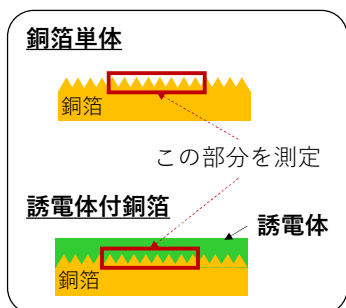
金属板での測定も可能!

無粗化金属は、
高周波の導電率は概ね直流での導電率に一致する



誘電体付き銅箔の測定例

誘電体：MPI
厚み：50um程度



この測定では樹脂の有無で
導電率に差はみられなかった

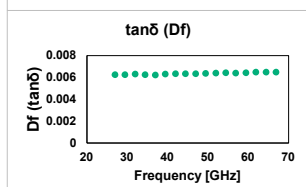
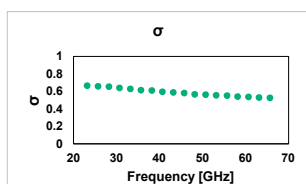
ファブリペロー
ブロードバンド
(23-110GHz)



ファブリペロー
Dバンド
(110-170GHz)

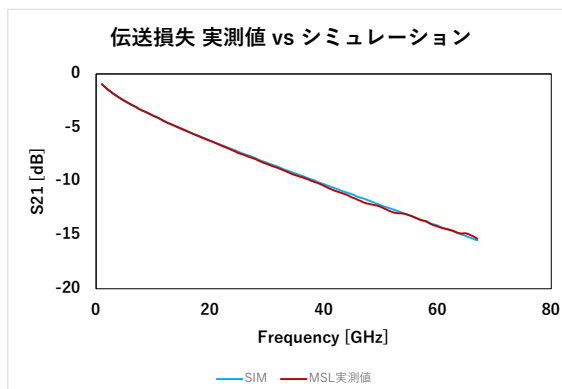


誘電率と導電率の実測値を使ったシミュレーション



シミュレーション

シミュレーション条件
Dk : 3.42
Df : σ : 左記周波数特性
線路 : 100mm
線路幅 : 90um
誘電体厚み 38um



導電率とDf共に実測値を用いてシミュレーションすると、極めて良く一致！
確認のために評価用基板を作製する必要がなくなる



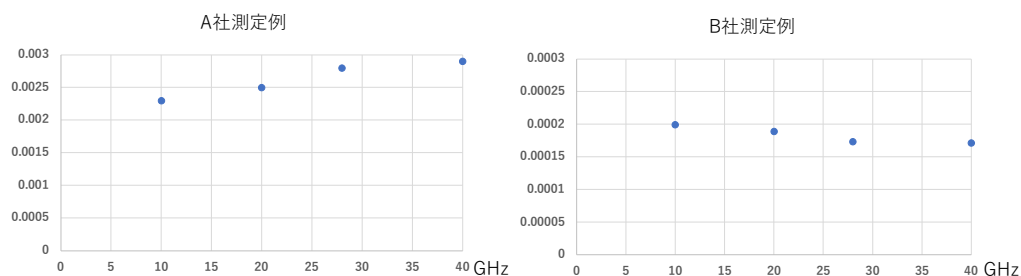
目次

- Chapter 1 ミリ波 材料測定の重要性とEMラボからのメッセージ
- Chapter 2 どんな素材メーカーが選ばれるか？
- Chapter 3 誘電率測定ソリューション
- Chapter 4 導電率が伝送特性に及ぼす影響
- Chapter 5 導電率測定ソリューション
- Chapter 6 測定装置・測定サービスを選ぶ際のポイント5つ

測定装置・測定サービスを選ぶ際のポイント5つ

- ① 測定難度の高い素材が測定できる
- ② 再現性が高い
- ③ 誰が測っても同じ値になる
- ④ 装置間で整合がとれた結果が得られる
- ⑤ 測定時間が短い

① 測定難度の高い素材が測定できる



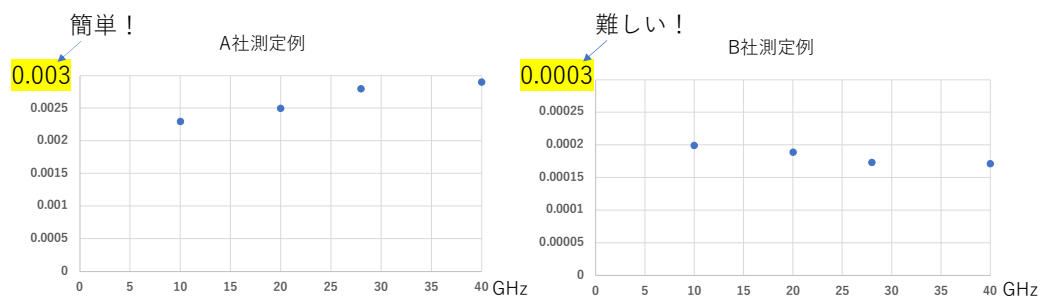
どちらも綺麗に測定できているように見えるけど・・・



① 測定難度の高い素材が測定できる

A社：説明用に作成した架空データ
B社：EMラボの実測データ

Point! 難度の高い測定ができているかを確認!



0.0003が綺麗に測定できる治具なら、0.003は綺麗に測定できます。
0.003が綺麗に測定できても0.0003が測定できるとは限りません。

オーダーが全然違う!
難度の高い測定をしているのはB社だ!



① 難しい測定とは？

誘電率

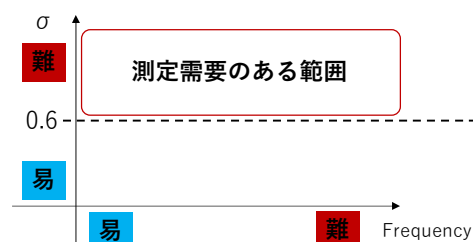
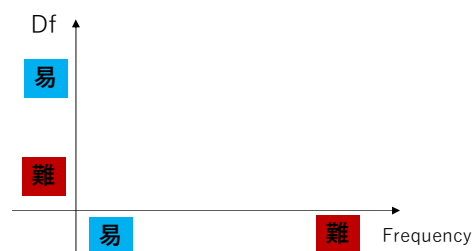
- ・ Df : 小さいほど難
- ・ Df : 試料が薄いほど難
- ・ 周波数 : 高いほど難

導電率

- ・ σ : 大きいほど難
- ・ 周波数 : 高いほど難



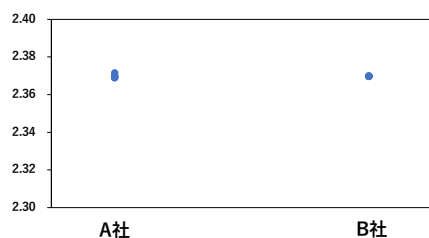
導電率の場合、
導電率の高い素材の実測例
を必ずチェックしよう！



② 再現性が高い

A社：説明用で作成した架空データ
B社：EMラボの実測データ

meas.	A社	B社
1	2.36970	2.36965
2	2.36890	2.36980
3	2.36972	2.36968
4	2.37136	2.36973
5	2.36890	2.36950
average	2.36972	2.36967
st dev.	0.00100	0.00011



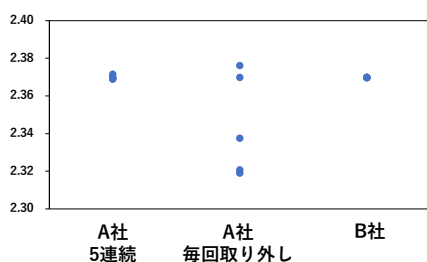
だいたい同じ値が得られているね。



② 再現性が高い

A社：説明用に作成した架空データ
B社：EMラボの実測データ

meas.	A社 5連続	A社 毎回取り外し	B社 毎回取り外し
1	2.36970	2.36970	2.36965
2	2.36890	2.33743	2.36980
3	2.36972	2.31895	2.36968
4	2.37136	2.37599	2.36973
5	2.36890	2.32066	2.36950
average	2.36972	2.34455	2.36967
st dev.	0.00100	0.02692	0.00011



Point !

再現性の評価方法を厳密にチェック！

再現性の確認方法

- ・ 同一試料を複数回測定する
- ・ 測定のために装置から取り外す

測定 → 取り外して裏返し →

測定 → 取り外して裏返し →

測定 → 取り外して裏返し →

測定 → . . .



毎回、空測定やキャリブレーションを
やり直すとさらに厳密だよ！



③ 誰が測っても同じ値が出る

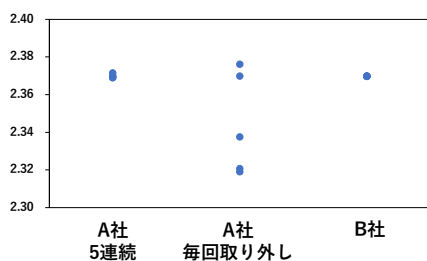
A社：説明用に作成した架空データ
B社：EMラボの実測データ

meas.	A社 5連続	A社 毎回取り外し	B社 毎回取り外し
1	2.36970	2.36970	2.36965
2	2.36890	2.33743	2.36980
3	2.36972	2.31895	2.36968
4	2.37136	2.37599	2.36973
5	2.36890	2.32066	2.36950
average	2.36972	2.34455	2.36967
st dev.	0.00100	0.02692	0.00011

Xさん

Yさん

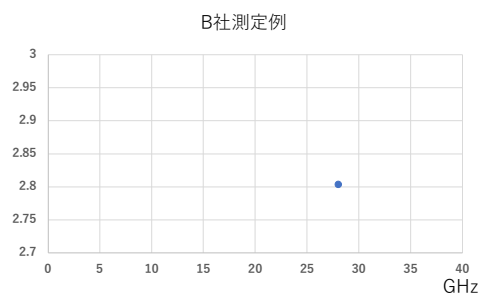
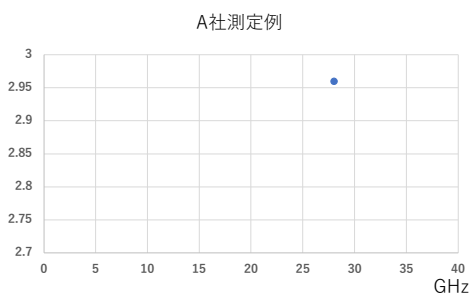
B社の測定値は
作業者が2人に分かれて実施したもの



Point !

自分で測定しても
同じ結果が得られるかをチェック！

④ 装置間で整合がとれた結果が得られる



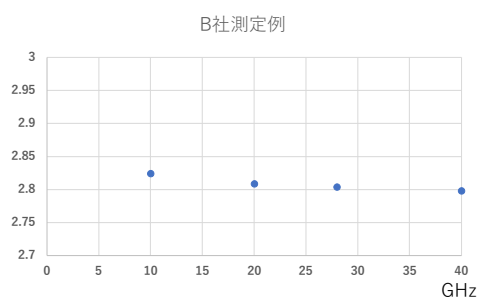
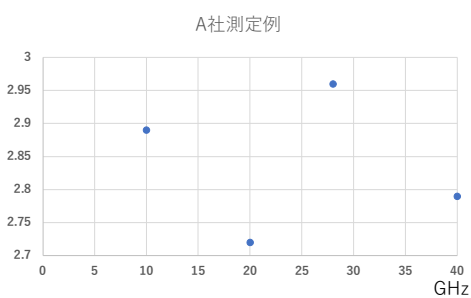
同じ素材を同じ周波数で測って、値が違う??



④ 装置間で整合がとれた結果が得られる

A社：説明用に作成した架空データ
B社：EMラボの実測データ
スプリットシリンダ共振器10,20,28,40GHzで測定

Point! 周波数特性を確認!



共振器法であっても、複数の周波数ラインナップがあれば周波数特性は取得できます。一貫性があるかを見定めることが装置選びのポイントです。

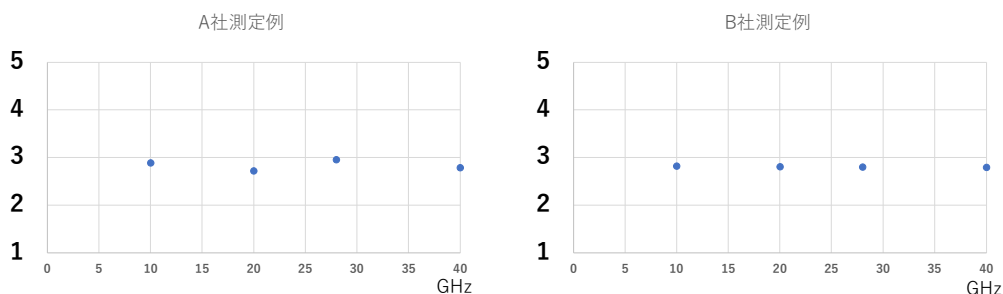
他の周波数との一貫性があると信頼できるね!



④ 装置間で整合がとれた結果が得られる

A社：説明用に作成した架空データ
 B社：EMラボの実測データ
 スプリットシリンダ共振器10,20,28,40GHzで測定

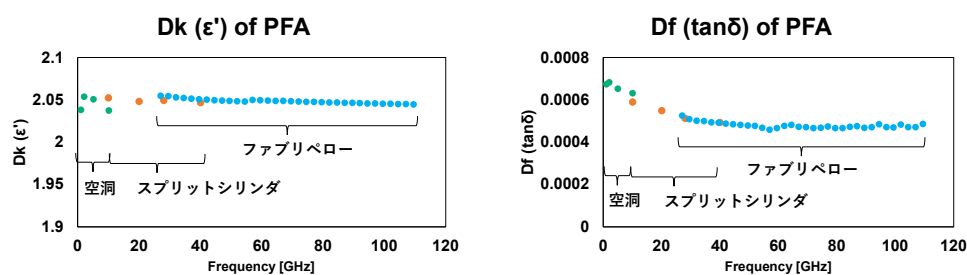
Point! スケールにも要注意!



縦軸のスケールで印象はかなり変わります

④ 装置間で整合がとれた結果が得られる

空洞共振器：1,2,5,10GHz
 スプリットシリンダ：10,20,28,40GHz
 ファブリペロー：25-110GHz
 測定試料：PFA (Perfluoroalkoxy alkane)



3種の異なる装置で整合がとれた結果を得られていることが分かる

Point!

複数の装置で整合がとれた結果を得られるかを確認!

世界標準試料がないので、測定値の絶対値が正しいかわからない。

理論・計算がまったく異なる複数の装置で同じものを

測定した結果を比較しておけば、安心して使える

各社の装置の
作り込み度合いが
しっかり
評価できるね!



⑤ 測定時間が短い装置か？

良い結果を出すためには、
時間もかかるのかな？



Point!

測定時間が短い方が優れた装置！

測定時間が短いと、

- 👍 治具やVNAの時間ドリフトを軽減可能
- 👍 大量の測定をする際も効率的

EMラボの製品なら！

	空測定 (事前準備)	試料測定 (1試料)
	3分/周波数34点	5分/周波数34点
	10秒	15秒
	10秒	15秒
	3分/周波数34点	5分/周波数34点

EMラボ フリースペースはさらに使いやすくなりました！

TRL校正なしで誘電率測定が可能！



Point!

測定の前に必ずTRL校正の実施が必要でしたが、TRL校正をせずとも誘電率測定が可能となりました。マイクロメーターを動かすこともなくなり、**より簡単で・正確な**測定を行えます。

EMラボ フリースペースはさらに使いやすくなりました！



NEW!
 フリースペース 材料測定ソフトウェア
 「FS-MA」
 2025年6月 販売開始！

ε', tan δ, μ', S21など、
 複数パラメータを同時に表示！

複数試料の測定結果を重ねて描画！
 比較がカンタン！

Point!

TRL校正なしで誘電率測定が可能！
 効率的な測定ができるインターフェース！



目の前で測定してもらえるサービスか？

「測定できます」とは言っていたけど、
 本当かな？

測定時間って、
 どのくらいかかるんだろう？

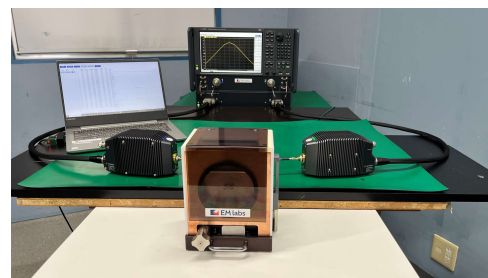
再現性が高いって言っていたけど、
 目の前で見てみたいな。

装置を導入したいけど、
 誰でも測定できそうかな？



Point!

百聞は一見に如かず！測定に立ち会おう！



測定について理解を深めるだけでなく、
 測定結果からは得られない情報を得ることが可能

- ・測定装置の準備の流れ
- ・測定手順
- ・測定にかかる時間
- etc...



