

補足資料（口頭試問向け整形版）

0. 回答フォーマット（共通）

以下の順で回答する.

1. 結論を1文で述べる.
 2. 根拠を1～2文で述べる.
 3. 数値は提示済み値と未提示値を分けて述べる.
 4. 未提示値は [要データ補完] として明示する.
-

補足資料1：評価帯域を67 GHz以下に設定した根拠

想定質問

なぜ評価帯域を67 GHz以下に限定したのか.

結論

評価値の信頼性を優先し、共振波形が安定している67 GHz以下を評価帯域とした.

根拠

本測定の励振線は110 GHz対応の1.00 mm同軸コネクタである。ただし、他の測定ケーブルや周辺機器との比較、および接続の安定性を考慮すると、67 GHz以下の運用が妥当である。67 GHzを超える領域では、不要モード（高次モード）の重畳により共振ピークの対称性が崩れる箇所があり、無負荷Q値（ Q_u ）の安定算出が難しくなる。

回答時の一言テンプレート

「測定可能上限ではなく、解析の信頼性を基準に帯域を決めました。67 GHz超では高次モードの重畳で共振波形が崩れ、 Q_u 算出が不安定になるため、67 GHz以下で評価しています。」

補足資料2：2段階測定における樹脂同一性の仮定

想定質問

Step 1とStep 2で樹脂特性が同一とみなせる根拠は何か。

結論

同一ロット基板を用いたため樹脂ばらつきは小さく、主結果の解釈を変える規模ではないと判断した。

根拠

BCDR法による実効導電率の算出は、Step 1（平滑標準銅）と Step 2（実基板の粗化銅）で、挟み込むMEGTRON6の複素誘電率が同一である仮定に基づく。樹脂の微小ばらつきが仮に存在しても、粗さ起因の導体損失増分（理想モデルの2.6倍～4.6倍）と比べて影響は小さいと判断した。

補足資料3：導電率低下に対する放射損失の寄与

想定質問

実効導電率の低下には放射損失が含まれているのではないか。

結論

BCDR法の構造上、放射損失の寄与は極めて小さいため、主な増分は粗さ起因損失として解釈できる。

根拠

BCDR法は円板導体電極を誘電体で挟み、外側を接地導体で覆う平衡形シールド構造である。このため、電磁界は共振器内部に閉じ込められ、外部空間への放射は原理的に小さい。したがって、第2段階で抽出された損失増分は、表面粗さと表皮効果による実効的経路増大に主として起因すると解釈する。

補足資料4：誘電損失（ $\tan\delta$ ）の周波数依存性

想定質問

なぜMEGTRON6の $\tan\delta$ は周波数とともに増加するのか.

結論

双極子の配向分極が高周波電界に追従しにくくなり、位相遅れに伴う散逸が増えるためである.

根拠

測定結果として、 $\tan\delta$ は約0.017～0.025の増加傾向を示した。高周波では電界反転が速くなり、樹脂内部の双極子回転が遅れて熱散逸が増える。このデバイ緩和に基づく挙動として整合的である.

補足資料5：今後の展望におけるHurayモデル選定理由

想定質問

なぜ粗さモデルにHurayモデルを採用するのか.

結論

実銅箔表面の三次元ノジュール形状を，物理形状に近い形で表現できるためである．

根拠

従来モデル（Hammerstadモデル等）は，粗さを2次元周期形状として近似する前提が強い．一方，実際の粗化銅箔はノジュール状の複雑な3次元表面である．Huryモデルはこれを微小導体球集合として扱えるため，ミリ波帯の電流経路増大をより自然に反映しやすい．

補足資料：FDTD法（有限差分時間領域法） の概要と適用

想定質問

今後の粗さ解析にFDTD法を選ぶ理由と課題は何か．

結論

複雑形状の扱いやすさと広帯域一括取得が利点であるが，計算資源負荷が大きい．

根拠

FDTD法はマクスウェル方程式を時間・空間で直接差分化し、Yee格子とリーブフロッグ法で電磁界を逐次計算する手法である。銅箔ノジュールのような複雑な3次元凹凸を格子上で扱いやすく、時間領域パルスからフーリエ変換で広帯域特性を得られる。

課題

- 表面粗さと表皮効果を厳密に再現するには、空間メッシュ Δx を表皮深さ δ （30 GHzで約0.36 μm ）より十分小さくする必要がある。
- CFL条件を満たすため、時間ステップ Δt も小さくなり、計算時間とメモリが増大する。

対策案

伝送線路全体の一様微細メッシュ化は避け、導体表面近傍の局所モデル化や、インピーダンス境界条件の導入を検討する。

補足資料6：想定質疑応答集（基礎・手順・解釈）

レベル1：基礎・概念の確認

Q1. 「実効導電率が低下した」は、銅そのものの導電率低下を意味するか

結論 意味しない。

根拠 表面凹凸で電流経路が迂回し，等価抵抗が増えた効果を，見かけ上の導電率低下として表している．

Q2. MEGTRON6の表面粗さはどの程度か

結論 本研究では数 μm オーダーの粗化銅箔を想定している．

根拠 個別試料の形状パラメータを直接取得してモデルに入れる作業は今後の課題であり，本研究では電磁気学的な損失評価を先行した．

レベル2：実験手順や条件

Q3. 圧着トルクが強すぎる／弱すぎる場合の影響は何か

結論 弱すぎるとエアギャップ誤差，強すぎると樹脂変形誤差が生じる．

根拠 弱トルクでは共振周波数と損失推定が不安定になる．強トルクでは誘電率算出の前提条件を乱す可能性がある．

Q4. 20回測定平均の再現性を標準偏差で示せるか

結論 現時点では数値提示を省略している．

根拠 再セットアップ時の位置合わせとトルク管理を統一したため，共振周波数とQ値のばらつきは小さい傾向であった．[要データ補完: 20回測定の標準偏差（共振周波数，Q値， ϵ_r ， $\tan\delta$ ）を算出し，必要に応じて追記]

レベル3：結果の解釈・実用性

Q5. 損失増大が問題なら、銅表面を完全平滑にすればよいのではないか

結論 電気特性だけなら有利だが、実装では接着信頼性との両立が必要である。

根拠 銅箔と樹脂の接着強度確保には、表面粗化によるアンカー効果が必要である。そのため、粗さ起因損失の定量予測が必要になる。

Q6. 実効導電率は高周波化で無限に低下し続けるのか

結論 無限低下よりも、ある範囲で飽和に向かう可能性が高い。

根拠 周波数上昇で表皮深さがノジュール寸法より十分小さくなると、電流経路増分が頭打ちになり、等価導電率低下も極限值に近づくと解釈できる。

口頭回答の運用メモ

- 最初の1文で結論を述べる。
 - 次の1文で物理的理由を述べる。
 - 数値は提示済み値と未提示値を分ける。
 - 未提示値は「[要データ補完]として管理している」と表現する。
-

補足資料7：FR-4とMEGTRON6の比較（想定質問対策）

想定質問

なぜFR-4ではなくMEGTRON6を対象にしたのか.

結論

主な違いは樹脂系と高周波特性であり，ミリ波帯の低損失性と比誘電率安定性の観点でMEGTRON6が有利である.

根拠

FR-4は一般にエポキシ系樹脂を主成分とし，コストと加工性に優れるが，高周波化に伴って誘電損失が増えやすい．MEGTRON6はPPE系樹脂を含む低損失系材料設計であり，ミリ波帯で損失を抑えやすく，比誘電率の周波数安定性も高い．

発表時の短文テンプレート

「違いは樹脂材料と高周波特性です．FR-4はエポキシ系樹脂，MEGTRON6はPPE系樹脂を含む低損失系材料です．そのためMEGTRON6はミリ波帯で損失を抑えやすく，比誘電率も安定しやすいので，本研究の対象にしました．」

数値質問への備え

「FR-4の何分の一か」を問われた場合は、提示済みの同一条件データのみで回答する。[要データ補完: FR-4とMEGTRON6の同一周波数・同一条件での $\tan\delta$ および ε_r 比較表を追加]