

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

Measurement of Substrate Dielectric Loss and Surface-Roughness-Induced
Effective Conductivity Using a Balanced-Type Circular-Disk Resonator
(BCDR)

長野工業高等専門学校
電気電子工学科 5年 柳原 魁人
(指導教員 春日 貴志)

令和7年2月

目次

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 第 1 章 | 序論 | 2 |
| 1.1 | 研究背景 | 2 |
| 1.2 | 本研究の目的と課題 | 2 |
| 第 2 章 | 測定基礎 (S パラメータと VNA 計測) | 4 |
| 2.1 | 誘電分極と複素誘電率 | 4 |
| 2.2 | 代表的な複素誘電率測定法 | 4 |
| 2.3 | S パラメータの基礎 | 5 |
| 2.4 | VNA の基礎 | 7 |
| 第 3 章 | BCDR 法と測定方法 | 8 |
| 3.1 | BCDR 法の概要 | 8 |
| 3.2 | 測定手順 | 8 |
| 第 4 章 | 測定結果と考察 | 11 |
| 4.1 | 複素誘電率の測定結果 | 11 |
| 4.2 | 実効導電率と表面粗さの影響 | 12 |
| 4.3 | 減衰定数への影響 | 13 |
| 第 5 章 | 結論 | 15 |
| 謝辞 | | 16 |

第 1 章 序論

1.1 研究背景

近年、人工知能（AI）やクラウドサービスの普及に伴い、データセンター等で扱うデータ通信量は増大している。これに対応するため、5G（第5世代移動通信システム）やその先の Beyond 5G/6G では、高周波帯域の利用とネットワークの高度化が政策的に進められている^[1]。高周波帯域では、信号がプリント基板を伝搬する際の減衰が大きくなるため、通信機器のハードウェア設計において、基板材料の損失特性を正確に把握することが不可欠となる。高周波電子部品の設計では、材料定数の測定結果が機器の性能評価に直結するため、測定の信頼性を意識した評価が求められる^[2]。プリント基板は、誘電体基材の両面に銅箔を貼り合わせた構造であり、銅箔は樹脂との密着性を高めるために表面を粗化したものが用いられる。高周波では電流が導体の表面近くに集中するため、粗化による微細な凹凸が電流の流れに影響しやすくなる。また、導体損失は表皮効果の影響を強く受け、信号周波数が高くなるほど電流が導体表面に集中する。表皮深さは周波数の増加で浅くなり、例えば 3 GHz で約 1.1 μm, 30 GHz で約 0.36 μm と報告されている^[3]。このように表皮深さが浅くなると、銅箔表面の微細な凹凸が電流の流れ方に影響し、導体損失が増える可能性がある。この可能性を測定で確かめることが、本研究の目的につながる。

1.2 本研究の目的と課題

プリント基板における信号減衰の主な要因として、以下の 2 点が挙げられる。

1. 誘電損失：基板の絶縁材料（誘電体）内部での熱エネルギーへの変換による損失。
2. 導体損失：配線導体（銅箔）の電気抵抗による損失。

複素誘電率は $\varepsilon_r^* = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r$ と表され、誘電正接は $\tan \delta = \varepsilon''_r / \varepsilon'_r$ で定義される。

これまで本研究室では、主に誘電損失に着目し、低損失基板の複素誘電率測定および評価を行ってきた^[4;5]。しかし、高周波帯域では表皮効果により電流が導体表面に集中するため、導体表面の微細な凹凸（表面粗さ）が電流経路を実質的に長くし、導体損失を増大させることができている^[6]。一般に、プリント基板の銅箔は樹脂との密着性を高めるために粗化処理が施されているが、従来の評価ではこの表面粗さによる損失の影響が十分に考慮されていなかった。

高周波信号が導体を伝搬する際、電流は導体内部に均一に流れず、表面近傍に集中する表皮効果が顕著になる。電流が流れる領域の深さの目安である表皮深さ δ は次

式で与えられる^[6].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.1)$$

ここで, f は周波数, μ は透磁率, σ は導電率である. 式から, 周波数が高くなるほど表皮深さが浅くなり, 導体表面の凹凸が電流経路に与える影響が大きくなることが分かる.

そこで本研究では, 平衡形円板共振器法 (Balanced Disk Circular Resonator: BCDR 法) を用いて, 低損失基板材料 (MEGTRON6) の複素誘電率と, 表面粗さを考慮した実効的な導電率を測定する. 得られた測定値から伝送線路の減衰定数を算出し, 表面粗さが信号伝送特性に与える影響を明らかにすることを目的とする.

第2章 測定基礎 (SパラメータとVNA計測)

2.1 誘電分極と複素誘電率

誘電体に電界を加えると、物質中の正電荷と負電荷がわずかにずれて、内部に電気双極子が生じる。この電荷のずれを誘電分極という。電界がなくなると、双極子は元の位置に戻るため、分極は消える。誘電分極には主に3種類がある。電子分極は原子核と電子雲のわずかなずれによって生じる。原子内で起こるため、ほとんどすべての物質で見られる。イオン分極は正負イオンが逆方向に変位して生じる。イオン結晶など、イオンの並びを持つ物質で現れやすい。双極子分極（配向分極）は、永久双極子が電界の向きにそろうことで生じる。水のように分子自体が双極子を持つ材料で大きくなる。交流電界では、分極の変化が電界に対して少し遅れる。分子やイオンの動きには時間がかかるため、周波数が高くなるほどこの遅れは大きくなる。その結果、電界のエネルギーの一部が熱として失われる。この遅れが、誘電損失の原因である。分極の種類ごとに追随できる周波数の上限が異なるため、周波数を上げると、まず双極子分極が追随できなくなり、次にイオン分極が効きにくくなる。さらに高い周波数では電子分極だけが残る。このため、比誘電率は周波数の増加とともに小さくなる傾向を示す。この現象を表すため、電束密度 D と電界 E の関係は複素誘電率で表す。

$$D = \epsilon^* E = \epsilon_0 (\epsilon'_r - j\epsilon''_r) E \quad (2.1)$$

ここで、 ϵ'_r は比誘電率の実部、 ϵ''_r は誘電損失である。誘電損失の大きさは、誘電正接 $\tan \delta = \epsilon''_r / \epsilon'_r$ で表す。本研究では、これらの量を測定して基板材料の損失特性を評価する。

2.2 代表的な複素誘電率測定法

複素誘電率の測定法は、測定したい周波数帯や材料損失の大小に応じて選択される。本研究で関係が深い代表例を、集中定数法、反射伝送法、共振法の3つに分けて述べる^[2]。

2.2.1 集中定数法

試料を平行平板電極で挟み、コンデンサとして扱う方法である。静電容量 C とコンダクタンス G を測定し、試料寸法を用いて ϵ'_r と ϵ''_r を求める。このとき、測定系は並列の C と G の等価回路で表されるとみなす。低周波帯で用いられるが、高周波では電極間隔が無視できず、空隙（エアギャップ）や端部の電界の広がりが誤差の原因になりやすい。

2.2.2 反射伝送法 (S パラメータ法)

試料に電磁波を入射し、反射波と透過波の振幅と位相を VNA で測定して複素誘電率を求める方法である。導波管や同軸線路内に試料を置く方法に加え、アンテナを用いるフリースペース法がある。高周波では分布定数回路として扱う必要があり、S パラメータから逆算して材料定数を求める。広帯域の特性が得られる一方で、低損失材料では信号変化が小さく、測定誤差の影響を受けやすい。

2.2.3 共振法

共振器に試料を入れ、共振周波数の変化と Q 値の低下から ε'_r と $\tan \delta$ を求める方法である。共振現象を使うため低損失材料でも高い精度で測定できるが、測定できる周波数は共振器の構造で決まる。本研究の BCDR 法は共振法に分類され、高次モードを使うことで広い周波数帯で測定できる点が特徴である。

2.3 S パラメータの基礎

高周波回路の評価では、電圧や電流を直接測ることが難しい。これは、測定プローブが回路へ影響を与えることや、導波管のように電圧・電流の定義が曖昧になる伝送路があるためである。そこで、高周波領域では回路網をブラックボックスとして捉え、入射波と反射・透過波の関係から特性を評価する方法が広く用いられる。この関係を表す量が S パラメータ (Scattering parameter) である^[7;8]。

2.3.1 S パラメータの定義

2 ポート回路網を例に、ポート 1, 2 への入射波を a_1, a_2 、出射波を b_1, b_2 とするとき、S パラメータは次式で定義される^[7;8]。

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

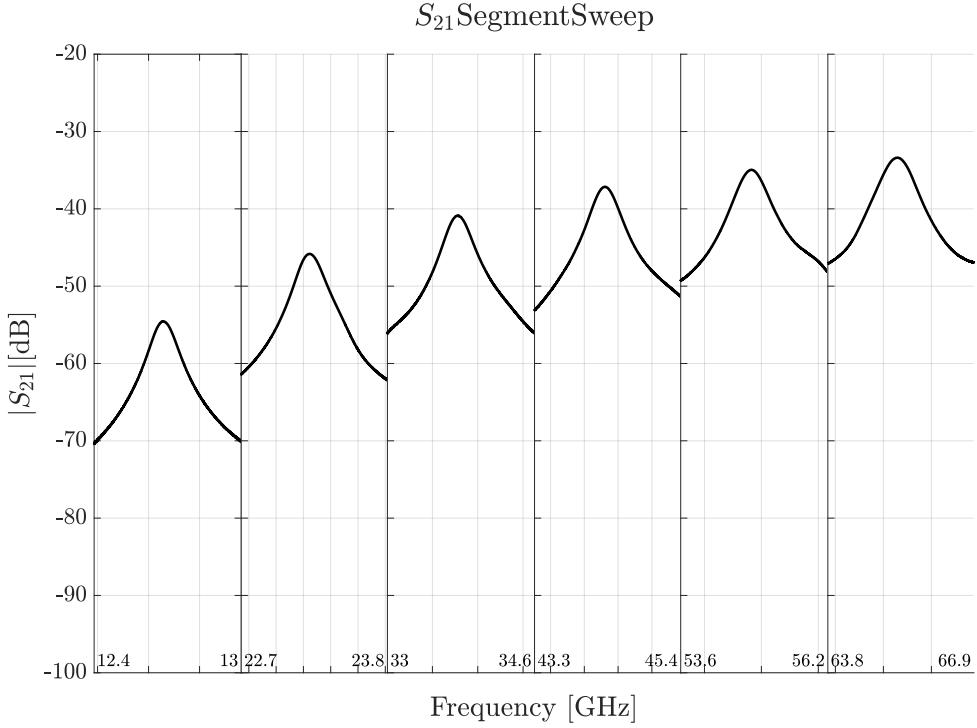


図 2.1 2 ポート回路網における S パラメータの概念図（今回の実験で得た S パラメータの例）

各 S パラメータは、一方のポートを整合終端（反射が生じない終端）にし、他方から信号を入射したときの比で定義される。整合終端とは、ポートの入力インピーダンスを基準インピーダンス Z_0 に一致させ、反射を起こさない終端である。実験では通常 50Ω のダミーロードを用いる。整合が不十分だと反射が混ざり、S パラメータが歪むため注意が必要である。例えば、ポート 2 を整合終端にして $a_2 = 0$ とすると、

- $S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}$: 反射係数。入射波のうちポート 1 に戻る成分の比である。
- $S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}$: 透過係数。入射波のうちポート 2 へ通過する成分の比である。

と表される。 S_{11} はリターンロス、 S_{21} は挿入損失として評価されることが多い。

2.3.2 基準インピーダンスとデシベル表記

S パラメータは基準インピーダンス Z_0 に対する相対量として定義される。高周波測定では $Z_0 = 50\Omega$ が一般的である^[7]。あるポートの入力インピーダンスを Z_{in} とすると、反射係数は

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.3)$$

で表される。よって、 $Z_{in} = Z_0$ のとき $S_{11} = 0$ となり、反射が生じない。

S パラメータの大きさは、広いダイナミックレンジを扱うためデシベル (dB) で表すことが多い。S パラメータは電力比の平方根に相当するため、

$$S_{ij} [\text{dB}] = 20 \log_{10} |S_{ij}| \quad (2.4)$$

で換算する^[7]. 例えば, $|S_{ij}| = 1$ は 0 dB, $|S_{ij}| = 1/\sqrt{2}$ は -3 dB に対応する.

2.3.3 差動伝送とミックストモード S パラメータ

差動線路の評価では, シングルエンドの S パラメータを拡張したミックストモード S パラメータが用いられる^[7]. 差動伝送では, 2 本の導体に逆相の信号を印加するディファレンシャルモードが主信号であり, 同相成分はコモンモードとして扱われる. 4 ポート VNA で得られたシングルエンド S パラメータから変換することで, 差動モードとコモンモードの伝送特性やモード変換量を評価できる. 代表的な成分は以下のとおりである.

- S_{dd21} : 差動透過係数. 差動信号が差動信号として出力される割合を表す.
- S_{cc21} : コモンモード透過係数. コモンモード信号の伝搬のしやすさを表す.
- S_{dc21}, S_{cd21} : 差動-コモンモード間の変換量. 線路の不平衡性の指標となる.

2.4 VNA の基礎

ベクトルネットワークアナライザ (VNA) は, S パラメータの振幅と位相を測定する装置である^[8]. 振幅のみを測るスカラーネットワークアナライザと比べて, 位相情報まで取得できる点が特徴である. 高周波帯では理想的な整合状態を作ることが難しい. そこで VNA は測定系のずれを補正し, 校正で基準面を決めて測定する^[8].

第3章 BCDR法と測定方法

3.1 BCDR法の概要

本研究では、測定手法としてBCDR法を用いた。BCDR法は、2枚の誘電体基板で円板状の共振器を挟み込み、特定の共振モード(TM_{0m0} モード)を励振させることで、材料定数を測定する手法である^[4]。本手法は、非放射性の共振モードを利用するため外部への放射損失が極めて小さく、高いQ値が得られるという特徴がある。これにより、低損失な材料であっても高い精度で測定できる。また、導体損失と誘電損失を分離して評価できる利点を有する。共振器の損失分離は近似的に $1/Q = 1/Q_d + 1/Q_c + 1/Q_r$ と表され、低損失誘電体では $Q_d \approx 1/\tan\delta$ とみなせる。BCDR法では測定された共振周波数 f_r と無負荷Q値 Q_u から材料定数を算出する。無負荷Q値は共振器内の全損失を表し、次式のように誘電体損失と導体損失を分離して扱う^[4;9]。

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r} \quad (3.1)$$

ここで、 Q_r は放射損失に対応するQ値である。BCDR法は非放射性モードを用いるため、 Q_r は十分大きく、近似的に無視できる。導体損失は導体の表皮深さ δ_s を用いて近似できる^[4;9]。

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi f_r \mu_0 \sigma}} \quad (3.2)$$

$$Q_c = \frac{t_c}{\delta_s} = t_c \sqrt{\pi f_r \mu_0 \sigma} \quad (3.3)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_r \mu_0}{\sigma}} \quad (3.4)$$

ここで、 t_c は円板電極の厚さ、 σ は導電率、 μ_0 は真空の透磁率である。BCDR法の利点は次のとおりである。 TM_{0m0} モードだけを選択的に使うため不要なモードの影響を抑えやすい。円板電極の直径を変えるだけで共振周波数が大きく変わるので、同じ装置で広い周波数帯を測れる^[4]。試料は板状のまま挟み込むだけでよく、形状加工の手間が小さい。

3.2 測定手順

本研究では、以下の2段階のプロセスにより、基板の誘電特性と導体の実効導電率を分離して測定した。

3.2.1 基準複素誘電率の測定

まず、エッチング処理により銅箔をすべて除去した MEGTRON6 基板を用意し、表面が平滑な標準銅円板(直径 15 mm)を挟み込んで BCDR 測定を行う(図 3.1). 標準銅円板の導電率は既知であるため、この測定により基板材料自体の比誘電率 ε'_r および誘電正接 $\tan \delta$ を算出することができる。

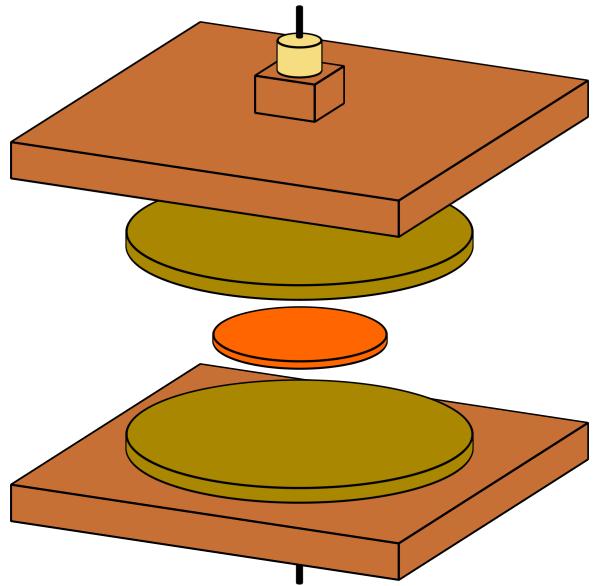


図 3.1 標準銅円板を用いた誘電特性の測定概要

3.2.2 実効導電率の測定

次に、測定対象の基板にあらかじめ付着している銅箔を、直径 15 mm の円板状に残すようにエッチング処理を行い、同様に BCDR 測定を行う(図 3.2). ここでは、前節で求めた基板の複素誘電率を既知の値として用いる。標準銅円板を用いた場合と比較して Q 値が低下する分を、銅箔の表面粗さに起因する損失として捉え、実効導電率 σ_{eff} を逆算する。

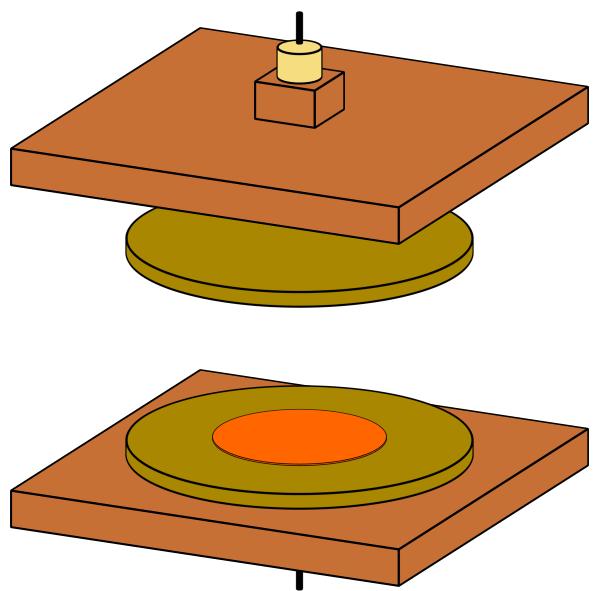


図 3.2 実基板の銅箔を用いた実効導電率の測定概要

具体的には、次式の関係を用いる^[4;9].

$$\frac{1}{Q_c} \approx \frac{1}{Q_u} - \frac{1}{Q_d} \quad (3.5)$$

ここで、 Q_u は測定された無負荷 Q 値、 Q_d は基準測定で得られた誘電体損失に対応する Q 値である。粗化表面の試料で得られた Q_u から Q_d を差し引いて Q_c を求め、 R_s を介して σ_{eff} を算出する。

3.2.3 圧着と位置合わせの管理

BCDR 法では、円板電極と試料の位置ずれや接触状態の違いが、共振ピークの形に影響し、誘電正接と実効導電率の算出に直接影響する。そのため、測定時は上下電極と試料をクランプで圧着し、トルクレンチで締め付け強さを管理した^[10]。円板電極はセンタリング用のリングシート（Shim シート）で位置決めし、円板の縁がシートに重ならないように合わせて、不要モードの励振を抑えた。また、試料の中心がずれると共振トレースが歪み、誘電正接が変動しやすいと報告されているため、位置合わせと圧着を複数回確認し、ピーク形状が安定した状態で本測定に入った^[10]。

第 4 章 測定結果と考察

ベクトルネットワークアナライザ (Keysight N5222B) を用い、周波数 10 GHz から 110 GHz の範囲で測定を行った。

4.1 複素誘電率の測定結果

MEGTRON6 基板の比誘電率 ε'_r および誘電損失 $\varepsilon'_r \tan \delta$ の周波数特性を図 4.1 および図 4.2 に示す。比誘電率 ε'_r は、測定周波数範囲において約 3.59 でほぼ一定の値を示した。一方、誘電損失 $\varepsilon'_r \tan \delta$ は周波数の上昇とともに増加する傾向が確認された。これは先行研究の報告と一致しており、BCDR 法による測定が妥当であることを示している^[4;5]。

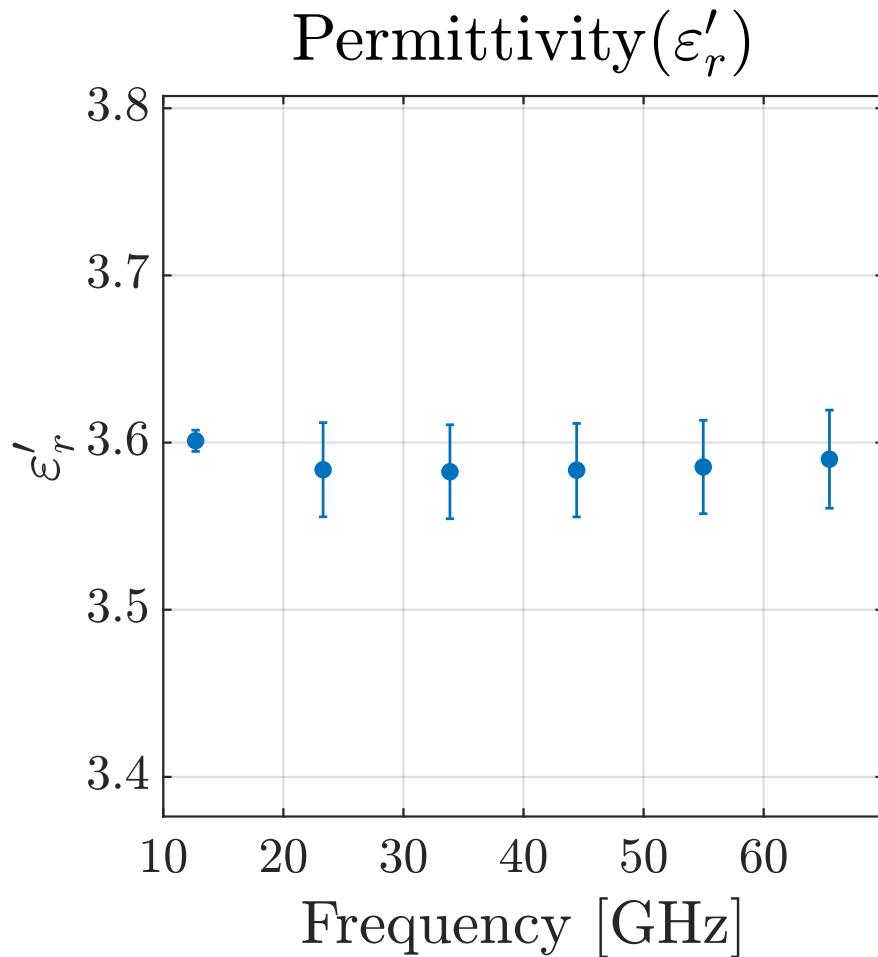


図 4.1 MEGTRON6 の比誘電率 ε'_r の周波数特性

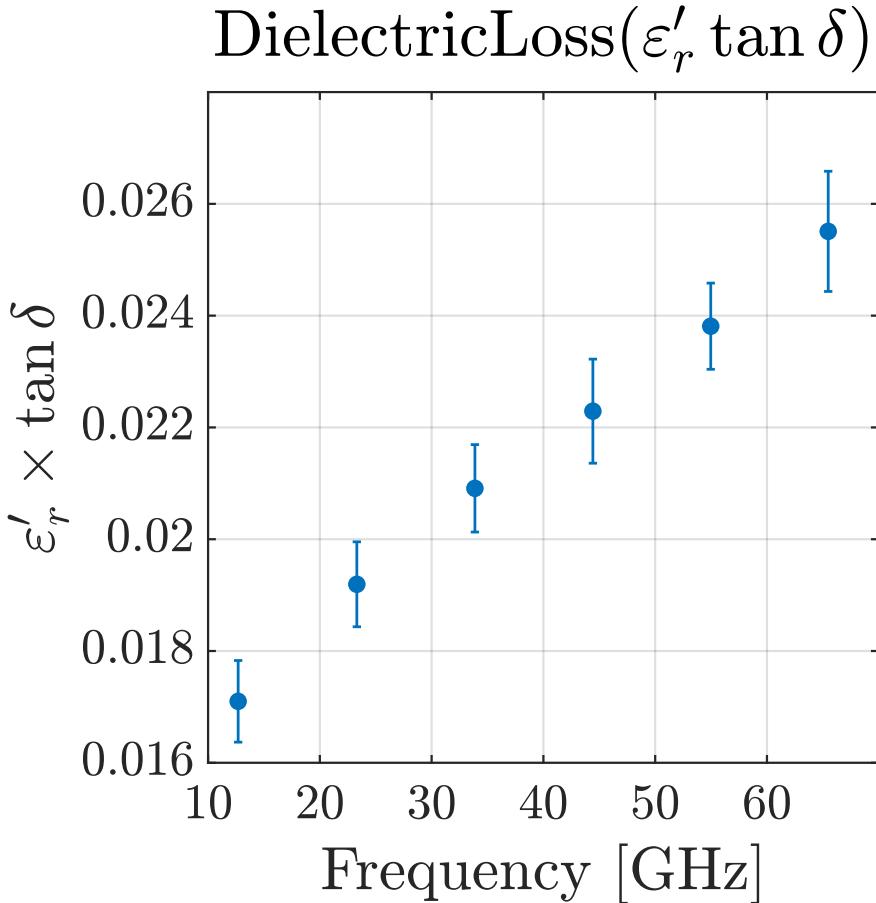


図 4.2 MEGTRON6 の誘電損失 $\varepsilon'_r \tan \delta$ の周波数特性

4.2 実効導電率と表面粗さの影響

図 4.3 に、算出した銅箔の実効導電率 σ_{eff} の周波数依存性を示す。比較のために銅の直流導電率（約 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ ）と比べると、低周波域では近い値であるが、周波数の上昇とともに実効導電率は低下する。特に 60 GHz 以上では、直流導電率の数分の一程度まで低下が見られる。

この傾向は、周波数が高くなるほど表皮深さが浅くなり、電流が導体表面の薄い層に集中するためである。表皮深さが銅箔表面の凹凸（粗さ）と同程度、またはそれ以下になると、電流経路が長くなり、見かけ上の抵抗が増大する。本測定結果は、高周波帯域で表面粗さの影響が無視できない可能性があることを示している。

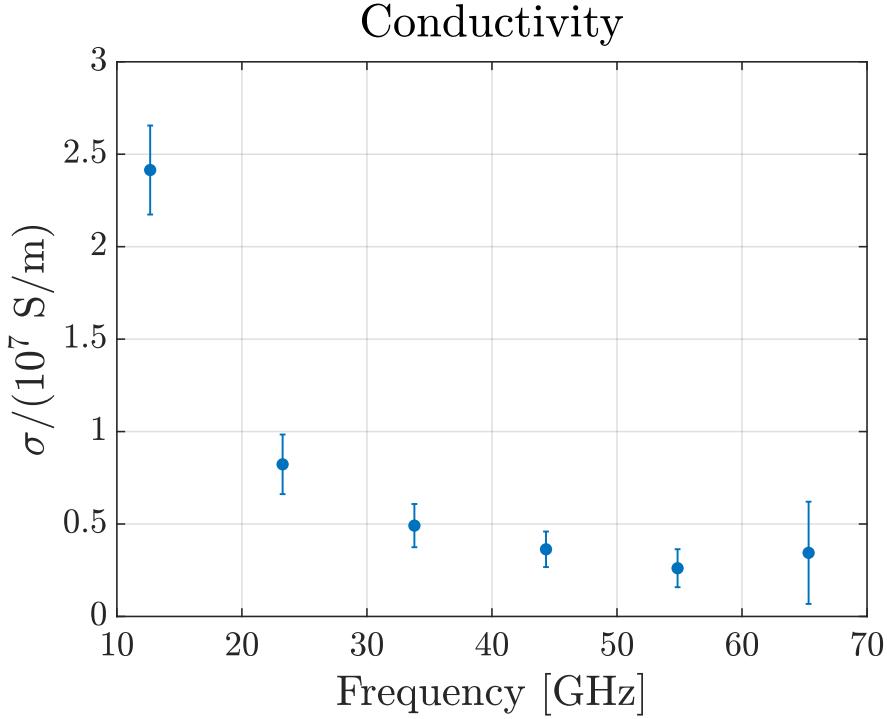


図 4.3 MEGTRON6 銅箔の実効導電率 σ_{eff} の周波数特性

4.3 減衰定数への影響

得られた複素誘電率と実効導電率を用いて、伝送線路における減衰定数 α を算出した結果を図 4.4 に示す。高周波領域では、減衰定数 α は導体損失による項 α_c と誘電損失による項 α_d の和として、次式のように近似できる^[11].

$$\alpha \approx \alpha_c + \alpha_d = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.1)$$

ここで、 R, L, G, C は線路の一次定数（抵抗、インダクタンス、コンダクタンス、キャパシタンス）である。本研究で評価対象とするマイクロストリップ線路では、形状パラメータと材料定数を用いて次の近似式を用いた。

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\varepsilon'_r + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98H}{0.8W + T} \right) \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon'_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon'_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10H}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d \quad (4.4)$$

$$\alpha_c = 0.17372 \times \frac{\sqrt{\pi f \mu_0 \rho}}{Z_0 W} \quad [\text{dB}/20\text{mm}] \quad (4.5)$$

$$\alpha_d = 0.17372 \times \frac{f \pi}{c} \cdot \varepsilon''_r \frac{\sqrt{\varepsilon_{re}} (\varepsilon_{re} - 1)}{\varepsilon_{re} (\varepsilon'_r - 1)} \quad [\text{dB}/20\text{mm}] \quad (4.6)$$

これらの式はマイクロストリップ線路の準 TEM 近似に基づく近似式である。ここで、 H は基板厚さ、 W は導体幅、 T は導体厚さ、 f は周波数、 μ_0 は真空の透磁率、 ρ は導体の体積抵抗率、 c は真空中の光速、 ε'_r は比誘電率の実部、 ε''_r は比誘電率の虚部、 ε_{re} は実効比誘電率、 Z_0 は特性インピーダンス、 α_c は導体損失による減衰定数、 α_d は誘電体損失による減衰定数、 α は全減衰定数である。導体の体積抵抗率は導電率の逆数であり、 $\rho = 1/\sigma$ の関係がある。本研究の実測モデルでは、この σ に測定から得られた $\sigma_{\text{eff}}(f)$ を代入した。ここでは、導電率を周波数に依らず一定とした「理想モデル」と、実測した実効導電率を用いた「実測モデル」を比較した。その結果、周波数が高くなるほど両者の差が大きくなり、実測モデルの方が減衰が大きいことが分かった。これは、導電率を定数として扱うと、実際の信号損失を過小評価するおそれがあることを示している。

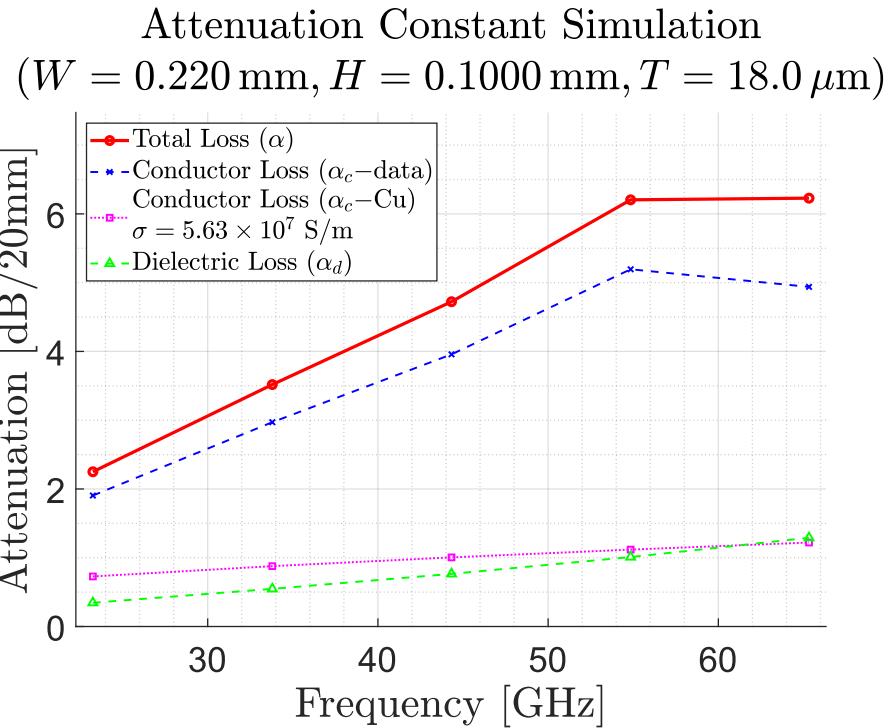


図 4.4 伝送線路の減衰定数 α の周波数特性比較

第 5 章 結論

本研究では、BCDR 法を用いて高周波用基板材料（MEGTRON6）の誘電特性および導体特性の評価を行った。比誘電率と誘電正接の測定に加え、表面粗さの影響を含んだ実効導電率を周波数依存性として求めた結果、以下の知見が得られた。

1. 比誘電率はほぼ一定であるが、誘電損失は周波数の上昇に伴い増加する傾向を示す。
2. 銅箔の実効導電率は、周波数の上昇に伴い顕著に低下する。これは表皮効果により、導体表面の粗さが電気伝導に及ぼす影響が大きくなるためである。
3. 実効導電率を用いて算出した信号減衰量は、理想的な導電率を用いた場合よりも大きくなる。

本研究で見られた σ_{eff} の低下は、銅箔の表面粗さで説明できる可能性がある。表面粗さが低い銅箔では、触針式粗さ計の先端が細かな凹凸に十分届かず、形状を正確に追いかける場合があるため、共焦点レーザー顕微鏡を用いた三次元評価が有効とされている^[3]。今後は、レーザー顕微鏡などを用いて銅箔表面の三次元粗さパラメータ（算術平均高さ S_a など）を測定し、その指標と σ_{eff} の関係を定量的に評価することが課題である^[12]。さらに、Huray の球状突起モデル^[13]などを参照し、測定された表面形状から導体損失を理論的に予測するモデルの構築も検討する。

以上の結果より、ミリ波帯などの高周波回路設計においては、基板の誘電損失だけでなく、表面粗さを考慮した導体損失の評価が不可欠であると結論付けられる。今後は、FDTD 法などの電磁界シミュレーションを用いた解析を行い、本測定手法および結果の妥当性についてさらなる検証を進める予定である。

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成にあたり、終始多大なるご指導ご鞭撻を賜りました春日貴志教授に深く感謝申し上げます。日頃の研究生活において、多くの有益な助言をいただきました、専攻科の内藤さくら氏、小池凜氏をはじめとする研究室の皆様に心から感謝いたします。また、本研究の審査を担当していただきました姜天水教授に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 総務省. Beyond 5g に向けた情報通信技術戦略の在り方. 最終答申, 情報通信審議会, 2024.
- [2] 加藤 悠人. 誘電率等材料定数の測定技術と標準供給に関する調査研究. Technical report, 産業技術総合研究所 計量標準総合センター, 2012.
- [3] 中田 臣弥, 岡本 健, and 森岡 伸哲. レーザー顕微鏡を用いた高周波基板用銅箔の表面粗さの評価. Technical report, 福田金属箔粉工業株式会社, 2021. 福田技報 (2021 年 10 月).
- [4] Y. Kato and M. Horibe. Broadband permittivity measurements up to 170-ghz using balanced-type circular-disk resonator excited by 0.8-mm coaxial line. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(6):1796–1805, June 2019.
- [5] 大日方 快至. フリースペース法による高速通信用基板材料の複素誘電率測定. 卒業論文, 長野工業高等専門学校, 2024.
- [6] 福田 元也 and 大野 憲一. 高周波用銅張積層板の伝送損失特性～表面粗さと処理技術の影響～. 技術報告書, 有限会社フクダ応用, 2021.
- [7] 藤城 義和. S パラメータ活用術, n.d. TDK EMC Technology 基礎編.
- [8] 藤井 勝巳. 周波数領域の信号計測技術 ネットワークアナライザ編. 情報通信研究機構, 2010.
- [9] Y. Kato. D-band material characterization using a balanced-type circular disk resonator with waveguide interfaces and a modified full-wave modal analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72, 2023. Art. no. 6009210.
- [10] Keysight Technologies. *BCDR Advance Operation Guide*. Keysight Technologies, ver.1.6.10 hf-120g edition, February 2023.
- [11] 電気通信主任技術者試験対策委員会. 通信線路解説メモ（メタリック分野） β 2.2 版. Technical report, 電気通信主任技術者総合情報, 2018.
- [12] 中田 臣弥, 岡本 健, and 森岡 伸哲. レーザー顕微鏡を用いた高周波基板用銅箔の表面粗さの評価. Technical report, 福田技報, 2021.
- [13] P. G. Huray, O. Oluwafemi, J. Loyer, E. Bogatin, and X. Ye. Impact of copper surface texture on loss: A model that works. In *DesignCon*, pages 462–483, 2010.