

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	測定原理および方法	3
2.1	BCDR 法の概要	3
2.2	測定手順	3
第 3 章	測定結果と考察	5
3.1	複素誘電率の測定結果	5
3.2	実効導電率と表面粗さの影響	6
3.3	減衰定数への影響	7
第 4 章	結論	9
謝辞		10

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飛躍的に増大している。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6G通信においては、100 GHz帯における高周波帯域の利用が検討されている^[1]。このような高周波帯域では、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っている。

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。

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^[2;3]。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知られている^[4]。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。

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 測定原理および方法

2.1 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^[2]。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精度な測定が可能である。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。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^[2]。試料は板状のまま挟み込むだけによく、形状加工の手間が小さい。

2.2 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。

2.2.1 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 2.1）。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。

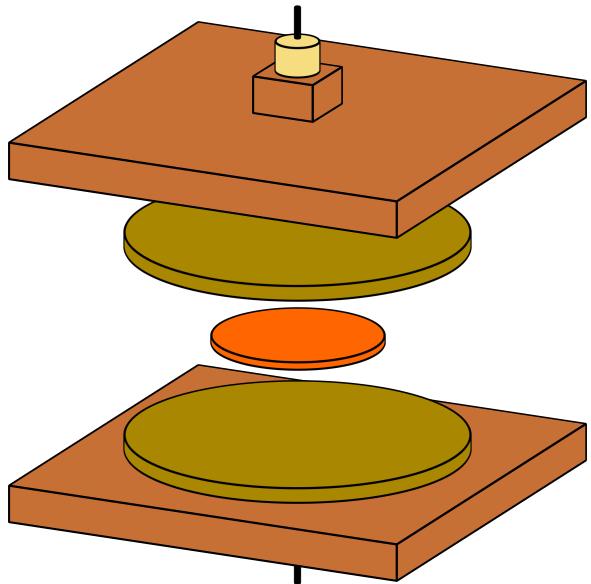


図 2.1 標準銅円板を用いた誘電特性の測定概要

2.2.2 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 2.2）。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。

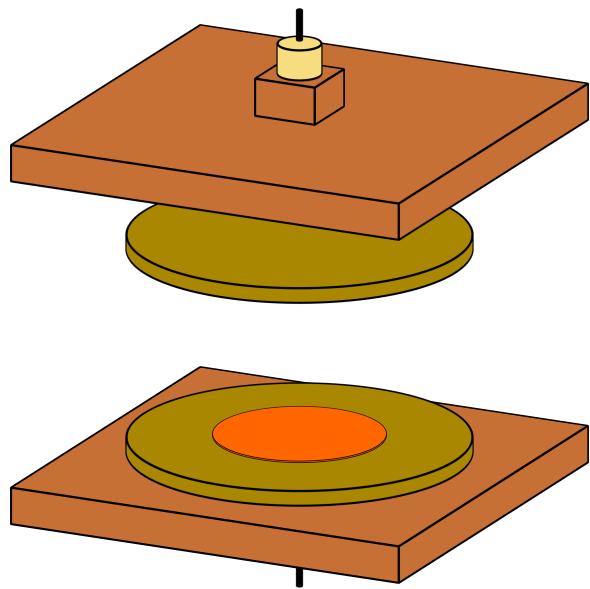


図 2.2 実基板の銅箔を用いた実効導電率の測定概要

2.2.3 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^[5]。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^[5]。

第3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。

3.1 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 $\epsilon'_r \tan \delta$ の周波数特性を図 3.1 および図 3.2 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 $\epsilon'_r \tan \delta$ 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^[2;3]。

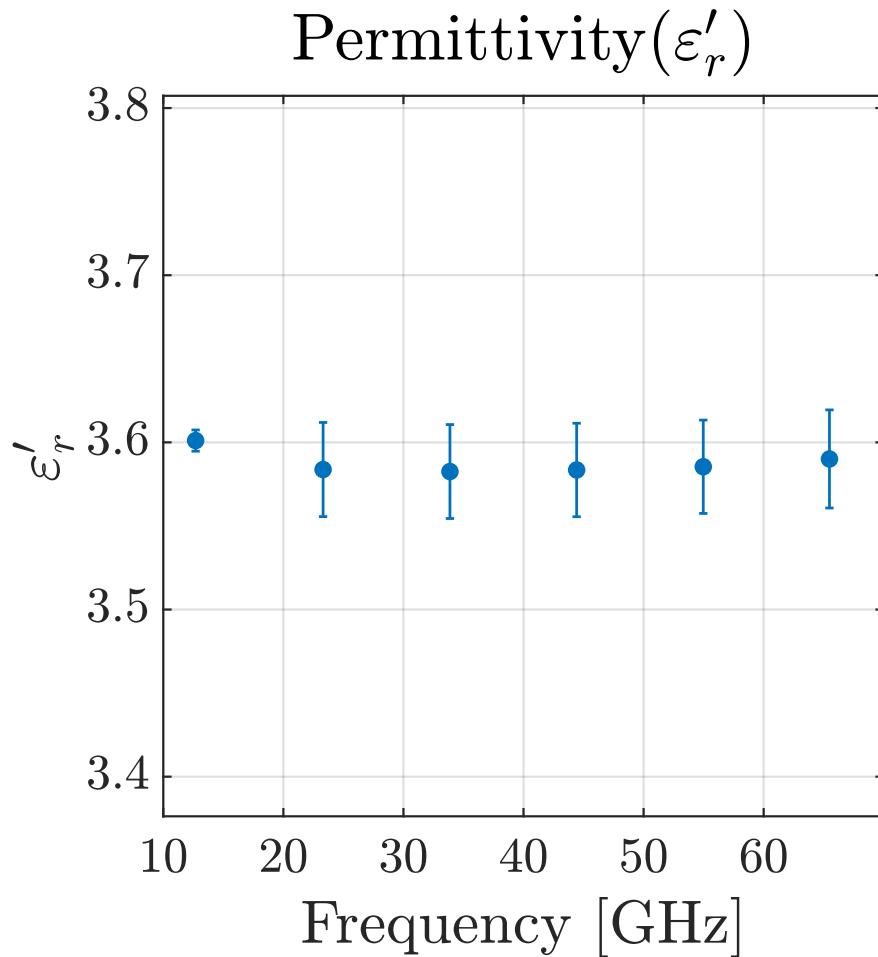


図 3.1 MEGTRON6 の比誘電率 ϵ'_r の周波数特性

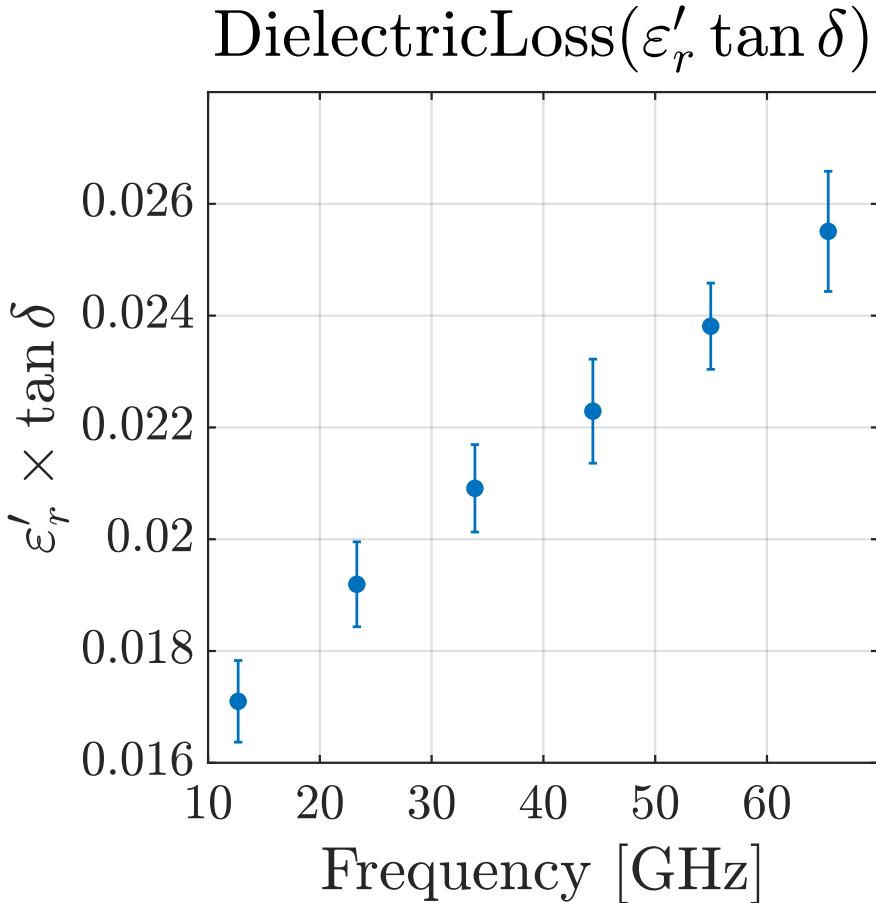


図 3.2 MEGTRON6 の誘電損失 $\varepsilon'_r \tan \delta$ の周波数特性

3.2 実効導電率と表面粗さの影響

図 3.3 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 5.8×10^7 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。

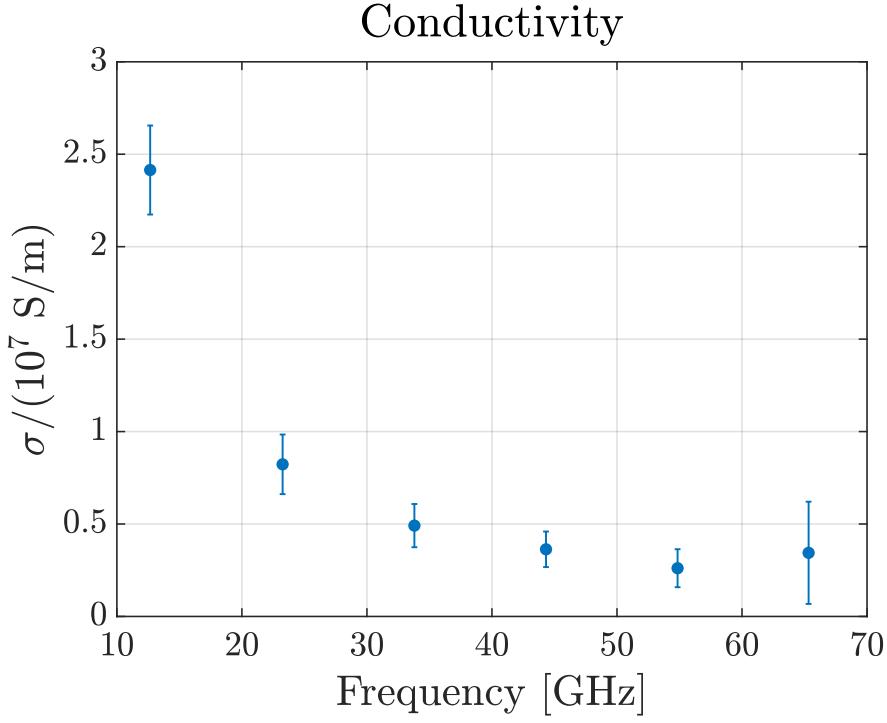


図 3.3 MEGTRON6 銅箔の実効導電率 σ_{eff} の周波数特性

3.3 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 3.4 に示す。算出には次の式を用いた。

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\varepsilon'_r + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98H}{0.8W + T} \right), \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon'_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon'_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10H}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.2)$$

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d, \quad (3.3)$$

$$\alpha_c = 0.17372 \times \frac{\sqrt{\pi f \mu_0 \rho}}{Z_0 W} \quad [\text{dB}/20\text{mm}], \quad (3.4)$$

$$\alpha_d = 0.17372 \times \frac{f \pi}{c} \cdot \varepsilon''_r \frac{\sqrt{\varepsilon_{re}} (\varepsilon_{re} - 1)}{\varepsilon_{re} (\varepsilon'_r - 1)} \quad [\text{dB}/20\text{mm}]. \quad (3.5)$$

ここでは、導電率が周波数によらず一定であると仮定した「理想モデル」と、本研究で得られ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、従来の設計手法のように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危険性があることを示唆している。

Attenuation Constant Simulation
($W = 0.220$ mm, $H = 0.1000$ mm, $T = 18.0 \mu\text{m}$)

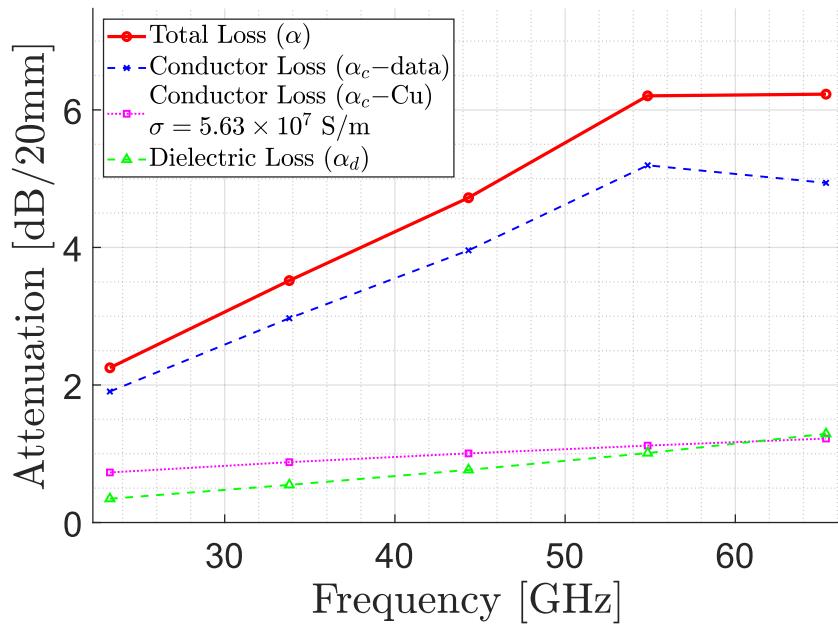


図 3.4 伝送線路の減衰定数 α の周波数特性比較

第4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高い。Hurayの球状突起モデルなどを参照し、^[4;6]今後は銅箔の三次元粗さ(例: Sa, Rz)を測定し、その指標と σ_{eff} の関係を実測で確かめて設計へ反映する予定である。

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はなく、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. 中間答申, 情報通信審議会, 2022.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Keysight Technologies. *BCDR Advance Operation Guide*. Keysight Technologies, ver.1.6.10 hf-120g edition, February 2023.
- [6] 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.