

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 柳原 魁人
(指導教員 春日 貴志)

2026 年 2 月 14 日

目次

第 1 章	序論	2
1.1	背景	2
1.2	本研究の課題と目的	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	5
3.1	複素誘電率（基板の性質）	5
3.2	実効導電率（銅箔の性質）	8
3.3	信号減衰量の算出	8
第 4 章	考察	10
4.1	表面粗さの影響について	10
第 5 章	結論	11
	謝辞	12
付録 A	測定データ（mean \pm std, n=20）	14

第 1 章

序論

1.1 背景

近年、人工知能（AI）やクラウドサービスの急速な普及により、データ通信量が爆発的に増大している。これに対応するため、5G や次世代の 6G 通信では、100 GHz 帯という非常に高い周波数が使われようとしている。しかし、電気信号は周波数が高くなればなるほど、基板を通る際に信号が減衰する。この減衰を正確に見積もることが、高性能な通信機器を作る上で不可欠となっている^[1]。

1.2 本研究の課題と目的

基板での信号減衰には、大きく分けて 2 つの原因がある。

1. 誘電損失：基板の材料そのものが電気を熱に変えてしまう損失。
2. 導体損失：配線（銅箔）を流れる電気が抵抗によって熱になる損失。

これまで本研究室では、誘電損失の評価が主に行われ、その評価手法は確立されてきた^[2]。しかし、周波数が高くなると、電流は導体の表面の浅い部分に集中する。この現象は表皮効果と呼ばれる。高周波ほど電流が表面の浅い部分により強く集中し、配線表面のわずかな粗さ（凸凹）が損失を増大させることが知られている^[3]。銅箔は基板への接着性を高めるために粗化处理されている。

本研究の目的は、表面粗さを含めた導体損失を実測により評価し、実際の信号減衰にどれくらい影響するかを明らかにすることである。本実験では表面粗さの詳細なモデル化はまだ行っていない。

第 2 章

測定原理および方法

2.1 BCDR 法の概要

本研究では「平衡形円板共振器法 (BCDR 法)」という測定方法を用いた。この方法は、2 枚の基板で銅の円板を挟み込み、特定の周波数で共振させることで、材料の性質を高精度に測ることができる手法である [4]。

この手法の最大のメリットは、以下の手順を踏むことで、「材料の損失 (誘電損失)」と「表面の損失 (導体損失)」を切り分けて評価できる点にある。

2.2 測定手順

測定は以下の 2 ステップで行った。

ステップ 1：基準となる誘電率の測定

まず、基板 (MEGTRON6) の銅箔をすべて溶かして取り除き、代わりに表面が平滑な標準銅円板 (直径 15 mm) を挟んで測定を行う。標準銅板の性質は既知であるため、この測定で基板そのものの「比誘電率 (ϵ'_r)」と「誘電正接 ($\tan \delta$)」を正確に決めることができる。

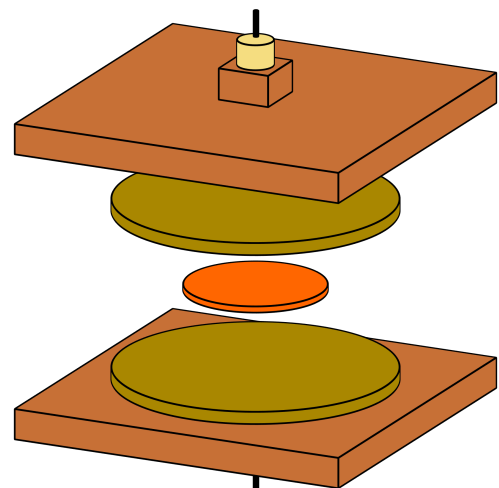


図 2.1 プロセス 1 の概略

ステップ 2：実効導電率の測定

次に，基板にもともと付いている銅箔を円形（直径 15 mm）に残したサンプルを作成し，同様に測定を行う．ステップ 1 で基板の性質はわかっているので，ステップ 1 とステップ 2 の結果の「差」を見れば，元々の銅箔が持っている表面粗さの影響（実効導電率 σ_{eff} ）を逆算することができる．

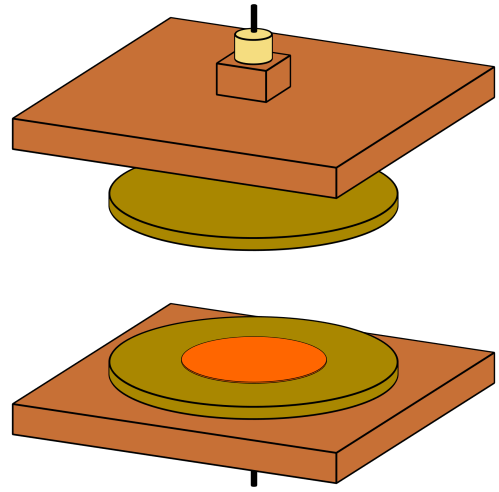


図 2.2 プロセス 2 の概略

第 3 章

測定結果

周波数 10 GHz から 67 GHz の範囲で測定を行った結果を示す.

3.1 複素誘電率（基板の性質）

基板材料（MEGTRON6）の比誘電率 ϵ'_r は、周波数が変わっても約 3.59 でほぼ一定であった（図 3.2）. 一方で、損失の割合を示す誘電損失 $\epsilon'_r \tan \delta$ は、周波数が高くなるにつれて増加する傾向が見られた（図 3.3）.

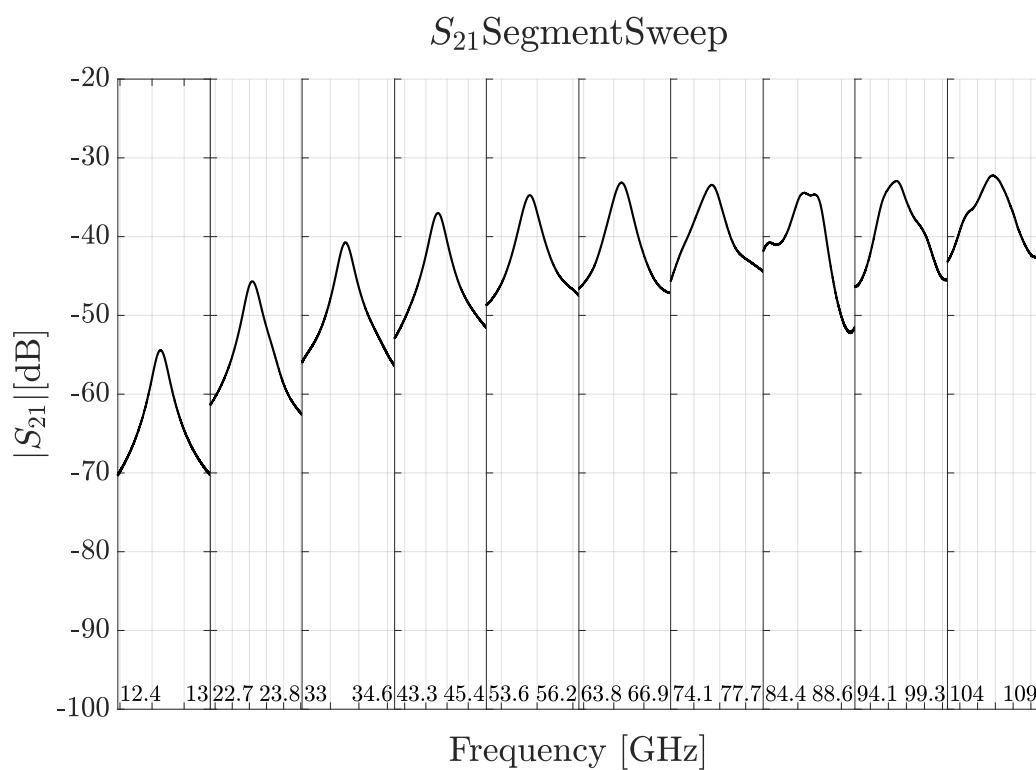


図 3.1 BCDR 法による共振波形の測定例 (S_{21})

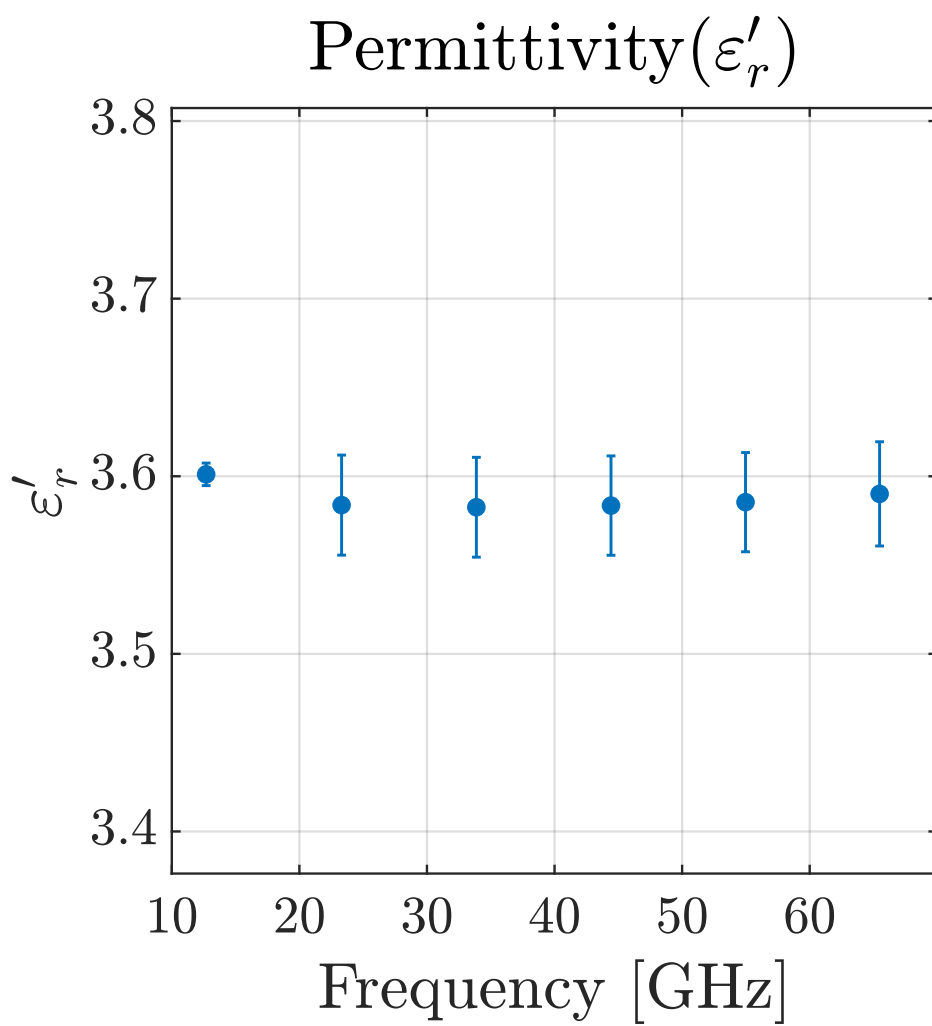


図 3.2 MEGTRON6 の比誘電率 ϵ'_r (mean, n=20)

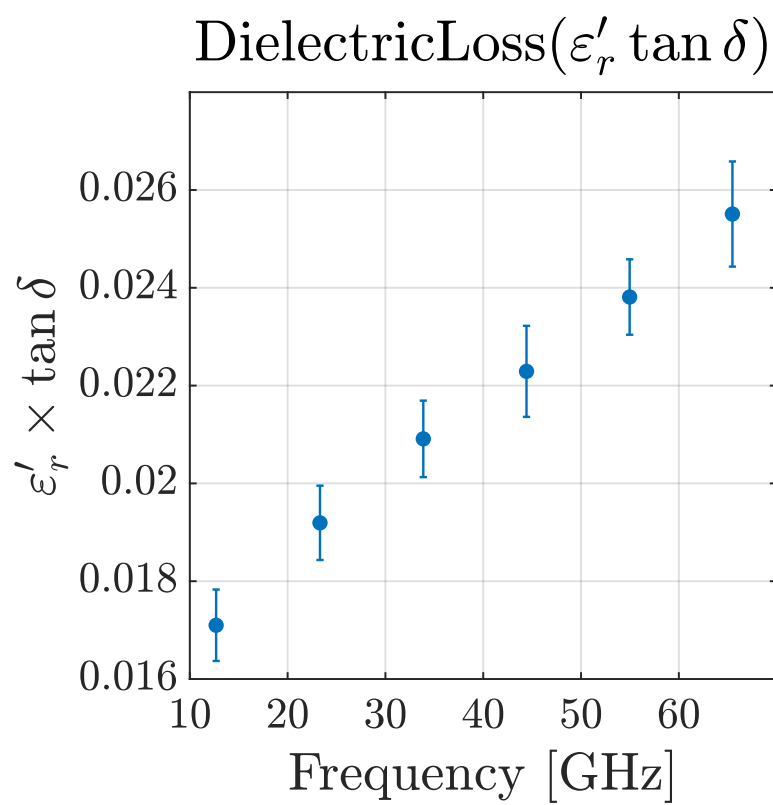


図 3.3 MEGTRON6 の誘電損失 $\epsilon'_r \tan \delta$ (mean, n=20)

3.2 実効導電率（銅箔の性質）

本研究で最も重要な結果が、導電率の変化である（図 3.4）。本来、銅の導電率は一定（約 $5.8 \cdot 10^7 \text{ S/m}$ ）とされることが多い。しかし測定の結果、表面粗さを含めた「実効導電率 σ_{eff} 」は、周波数が高くなるにつれて明らかに低下した。

例えば、低い周波数では高い導電率を保っていたが、65 GHz 付近では値が大きく下がっている。これは、高周波になるほど電気が表面の凸凹の影響を強く受け、流れにくくなっていることを示している。

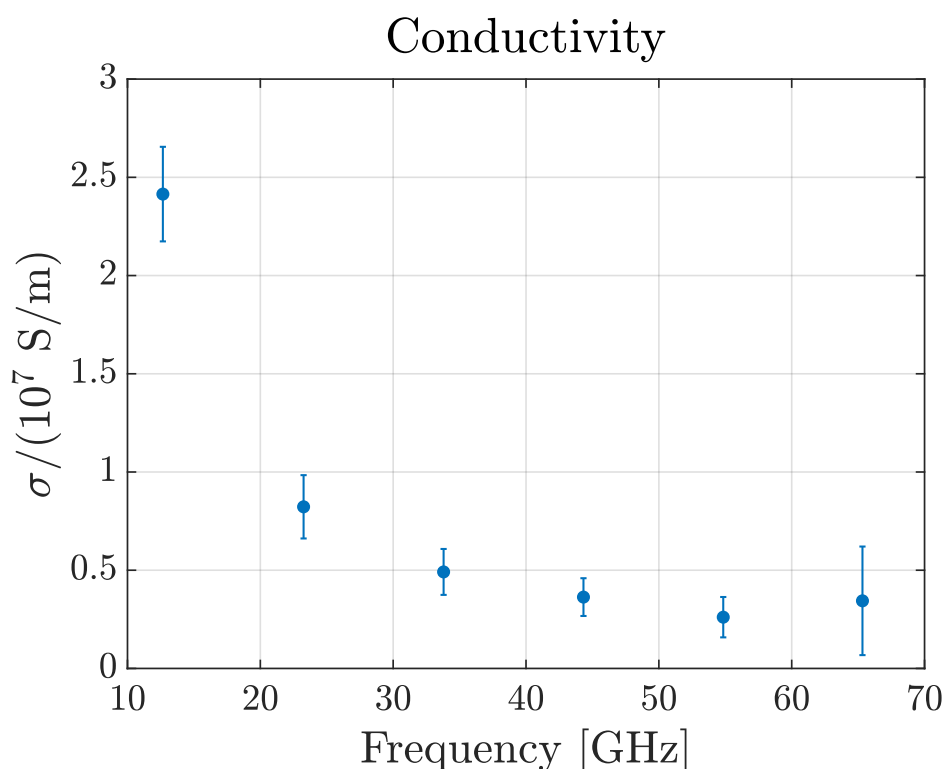


図 3.4 MEGTRON6 銅箔の実効導電率 $\sigma_{\text{eff}}(f)$ (mean, n=20)

3.3 信号減衰量の算出

測定されたデータをもとに、実際の回路でどれくらい信号が弱まるか（減衰定数 α ）を計算した（図 3.5）。「銅の導電率は一定」と仮定して計算した場合に比べ、今回の実測値（導電率低下を考慮）を使って計算した場合、信号の減衰量は高周波帯で明らかに大きくなることが確認された。

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

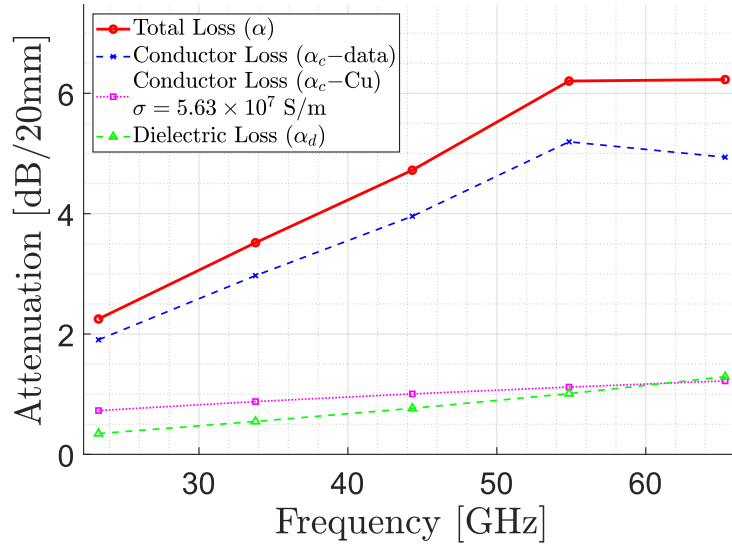


図 3.5 伝送線路の減衰定数 α (理想 vs 実効)

第 4 章

考察

4.1 表面粗さの影響について

測定結果から、高周波回路の設計において「銅の導電率は一定である」という従来の仮定を使うと、損失を実際よりも小さく見積もってしまう危険性があることがわかった。

周波数が上がると「表皮深さ（電気が流れる深さ）」が浅くなり、数ミクロンの表面の凸凹さえも電気の通り道としては大きな障害物となる。これが図 3.4 で見られた実効導電率の低下の主要因であると考えられる。

第 5 章

結論

本研究では、BCDR 法を用いて MEGTRON6 基板の特性評価を行った。得られた結論は以下の通りである。

1. 基板の誘電率は周波数によらずほぼ一定だが、誘電損失は周波数とともに増加する。
2. 銅箔の実効導電率は、周波数が高くなるにつれて表面粗さの影響で低下する。
3. この導電率の低下を考慮しないと、実際の信号減衰量を正しく予測できないことが示唆された。

今後は、シミュレーション（FDTD 法）など別の方法でも検証を行い、今回の測定結果の妥当性をさらに高めていく必要がある。

謝辞

本研究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．日頃の研究生生活において，多くのご指導をいただきました，同研究室の専攻科生の内藤さくらさん，小池凜さんにも心から感謝いたします．

審査を担当いただいた姜天水先生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, June 2022.
- [2] M. Tomioka et al. Measurement of complex permittivity of printed circuit boards using bcdp and free-space method up to 90 ghz, 2025. conference / in-prep.
- [3] 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.
- [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.

付録 A

測定データ (mean \pm std, n=20)

表 A.1 比誘電率 ϵ'_r (mean \pm std, n=20)

Frequency (GHz)	Mean ϵ'_r	Std ϵ'_r
12.6915	3.6009	0.0063
23.3084	3.5838	0.0274
33.8721	3.5826	0.0274
44.4253	3.5835	0.0272
54.9713	3.5852	0.0272
65.4813	3.5898	0.0286
75.9782	3.5927	0.0310
86.5899	3.5838	0.0248
96.6554	3.6115	0.0238
107.0115	3.5921	0.0161

表 A.2 実効導電率 σ_{eff} (mean \pm std, n=20)

Frequency (GHz)	Mean σ_{eff} (S/m)	Std (S/m)
12.6638	$2.4146 \cdot 10^7$	$2.4072 \cdot 10^6$
23.2561	$8.2279 \cdot 10^6$	$1.6116 \cdot 10^6$
33.7960	$4.9135 \cdot 10^6$	$1.1691 \cdot 10^6$
44.3247	$3.6321 \cdot 10^6$	$9.6109 \cdot 10^5$
54.8473	$2.6096 \cdot 10^6$	$1.0277 \cdot 10^6$
65.3264	$3.4419 \cdot 10^6$	$2.7636 \cdot 10^6$
75.7767	$1.4033 \cdot 10^6$	$1.6201 \cdot 10^6$
86.4699	$3.4072 \cdot 10^5$	$7.1732 \cdot 10^5$
96.5272	$1.0772 \cdot 10^6$	$1.8638 \cdot 10^6$
106.9216	$3.6553 \cdot 10^5$	$3.0212 \cdot 10^4$