

台本（改訂版）

下の各ページは台本用のページです。スライドの進行に合わせてお使いください。

ページ 1

目安時間：10秒

『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』と題しまして，長野高専 電気電子工学科 5年 春日研究室の柳原が発表します。よろしくお願いいたします。

ページ 2

目安時間：50秒

まず、研究の背景について説明します。近年、人工知能やクラウドサービスの普及により、データ通信量は爆発的に増大しています。これに対応するため、通信に使用する電波の高周波化が加速しており、次世代通信であるビヨンド・ファイブジーやシックスジーでは、100ギガヘルツ帯の利用が検討されています。

(間：2秒)

しかし、周波数が高くなるほど、プリント基板を伝搬する電気信号の減衰が大きくなるという物理的な課題があります。この信号の全損失アルファは、スライドのやや右側に示した式のとおり、樹脂部の誘電損失アルファ・ディーと、配線導体の抵抗に起因する導体損失アルファ・シーの和として表されます。

当研究室ではこれまで、誘電損失の評価手法を整備してきており、現在では十分に確立されています。一方で、導体損失については、導体と樹脂を接着させるために不可欠な、銅箔の表面粗さが特性に及ぼす影響について、定量的なデータが十分に得られていないという課題があります。

本研究では、この表面粗さが導体損失の増大に与える影響を明らかにすることを目指します。

ページ 3

目安時間：35秒

高周波信号では、表皮効果により電流が導体の表面近傍に集中して流れます。具体的に、電流が流れる領域の厚さである表皮深さは、周波数が高くなるほど薄くなります。

具体例として、3GHzでは約1.1マイクロメートル、30GHzでは約0.36マイクロメートルです。この値は、一般的な銅箔表面の凹凸高さと同程度か、それより小さい範囲です。そのため高周波では、電流経路が表面の凹凸の影響を受けて長くなります。結果として、実効的な抵抗が増加し、導体損失が増えると考えられます。

ページ 4

目安時間：45秒

本研究の目的は、表面粗さの影響を含んだ実効的な導電率を実験的に測定し、高周波帯における導体損失を定量的に評価することです。

この目的を達成するため、スライドに示す3つのステップで研究を行いました。

第1のステップは、平衡形円板共振器法、すなわちBCDR法を用いた複素誘電率の測定です。基板材料 MEGTRON6の比誘電率と誘電損失を、10ギガヘルツから110ギガヘルツの広い帯域で測定しました。

第2のステップは、実効導電率の測定です。同一の手法を用いて、表面粗さを有する銅箔の実効導電率を周波数依存性として評価しました。

第3のステップは、減衰定数の算出です。得られた実効導電率から伝送線路の減衰定数を算出し、実際の信号伝送において表面粗さが及ぼす影響を定量的に評価しました。

ただし、以降の特性評価と議論は、コネクタの運用範囲でありピーク形状が安定している、67ギガヘルツ以下のデータに絞って行います。

ページ 5

目安時間：25秒

本研究で測定対象とした材料は、パナソニック製の高周波基板材料、メグトロン・シックスです。

スライドの表に示した通り、一般的な電子機器では安価で加工性に優れたFR-4（エフアール・フォー）が広く用いられています。しかし、メグトロン・シックスは誘電損失が極めて小さいという特徴を持ち、5G基地局などの高速通信機器向けに開発された高性能な材料です。

次世代通信技術の確立には、このような高性能な基板の特性を正確に把握することが不可欠です。ミリ波帯のような高い周波数領域において、低損失材料の特性を精密に評価する手法として、今回用いるBCDR法は特に有効です。

なお、FR-4については先行研究で評価が行われているため、本研究ではメグトロン・シックスに焦点を絞って測定を実施しました。

ページ 6

目安時間：45秒

測定に用いたBCDR法、すなわち平衡形円板共振器法の原理について説明します。これは、評価対象の基板材料で円板状の導体電極を挟み込み、一種の共振器を構成する手法です。図に示す通り、同軸励振線から高周波信号を入力し、得られる共振特性を精密に測定します。

本研究の大きな特徴は、測定を2段階で行う点にあります。まず第1段階では、表面が極めて平滑な標準銅円板を用いて測定し、基板樹脂自体の複素誘電率を決定します。次に第2段階として、実基板上の粗化された銅箔を用いて同様の測定を行い、全損失を取得します。最終評価では、第2段階で得られた全損失から第1段階で求めた樹脂による損失分を差し引きます。これにより、表面粗さに起因する導体損失の増分を抽出し、実効導電率として算出します。

ページ 7

目安時間：30秒

ここで、ミリ波帯測定における注意点について触れます。本研究で扱うような高い周波数帯では、部品のわずかな位置ズレや圧着力のばらつきが、測定結果に大きな誤差をもたらす要因となります。

そのため本測定では、Shimシートを用いて円板導体の中心位置を合わせました。圧着力はデジタルトルクレンチで一定に管理しました。さらに、測定前にVNA校正を実施し、共振波形の安定を確認してからデータを取得しました。安定が確認できなければ、位置決めと圧着をやり直して再測定します。

ページ 8

目安時間：40秒

それでは、測定結果に移ります。こちらのグラフは、共振器の透過特性であるSパラメータを示しており、表示は20回の測定の平均値です。

グラフの山の頂点が共振点に対応します。ご覧の通り、左側の低い周波数から一番右の67GHz帯まで、ピークが鋭く対称性のよい波形が連続して得られています。

グラフ左側にはQ値の定義式を示してあります。Q値が高いほど、共振器の損失は小さいことを意味します。

一般的に、これほど高い周波数帯では少しの誤差で波形が崩れてしまいましたが、グラフ右側の通り、67GHz帯でも鋭いピークを維持しています。これにより、先ほどの徹底した位置決めと圧着によって、測定が非常に安定して正常に行われたことが確認できます。

この確かなデータを用いて、次の「複素誘電率」の算出へと進みます。

ページ 9

目安時間：35秒

次に、先ほどの共振データから算出した「複素誘電率」の結果です。

まず、左のグラフが比誘電率です。12GHz帯から65GHz帯にわたり、平均で約3.59とほぼ一定の値を示しました。

続いて、右のグラフが誘電損失です。同じ周波数範囲でおよそ0.017～0.025の範囲にあり、周波数上昇に伴って増加する傾向が見られます。

これらの傾向は先行研究と大きく矛盾せず、本測定で得られたデータの妥当性を支持します。

このデータを基に、次に本研究の主題である「表面粗さの影響」の評価へと進みます。

ページ 10

目安時間：45秒

続いて、本研究の主要な結果である、表面粗さを持つ銅箔の実効導電率について説明します。

まず、理想的な平滑な純銅の導電率は、このグラフの縦軸のスケールで約5.8の位置に存在します。つまり、グラフの枠をはるかに超えた上方に位置しています。

一方、今回測定した実効導電率は、左側の低い周波数帯の時点ですでに理想値を下回っています。さらに周波数が高くなると低下が進み、60ギガヘルツ付近ではおよそ0.3付近まで落ち込んでいることが分かります。

このように実効導電率が大きく低下する要因は、表皮効果によるものです。周波数が高くなるほど表皮深さが浅くなるため、電流分布が表面凹凸の形状により乱れます。その結果、実効的な電流経路が増大し、導体損失の増加を引き起こします。

では、この導電率の劇的な低下は、実際の信号伝送においてどの程度の損失をもたらすのでしょうか。次のスライドで、減衰定数の算出結果を示します。

ページ 11

目安時間：40秒

この導電率の低下が、実際の信号伝送にどの程度の影響を及ぼすかを確認するため、右側の数式を用いて伝送線路の「減衰定数」としてシミュレーションした結果がこちらのグラフです。

下のピンクの点線は、銅の表面が完全に平滑であると仮定した「理想モデル」の導体損失です。それに対し、上の青い点線は、本研究で得られた「実測モデル」の導体損失を示しています。

この2つを比較すると、実測モデルにおける導体損失は、理想モデルに対しておよそ2.6倍から4.6倍に増大していることが分かります。

さらに、グラフの一番上にある赤い実線が、誘電損失などをすべて含んだ「総減衰定数」です。こちらは60ギガヘルツ帯において、最大で**約6.2（デシベル・パー・20ミリメートル）**に達しました。

これらの結果から、高周波帯の設計において表面粗さを考慮しない従来のモデルでは、実際の損失を大きく過小評価してしまう可能性が高いことが定量的に確認できました。

最後に、本研究のまとめと今後の展望について述べます。

ページ 12

目安時間：55秒

続いて、今後の展望について述べます。本研究では表面粗さが導体損失を増加させることを確認しましたが、今後はこの結果を、より定量的な設計指針へと繋げることを目指します。具体的には、スライドに示す3つのステップを想定しています。

第1のステップは、表面形状の精密測定です。触針式粗さ計では捉えきれない微細な凹凸を、共焦点レーザー顕微鏡を用いて三次元測定します。

第2のステップは、モデル化です。得られた三次元形状データをHuray（ヒューレイ）モデルなどの表面粗さモデルに適用し、導体損失を予測する式を構築します。

第3のステップは、シミュレーション検証です。FDTD法などの電磁界解析を用い、モデル予測と実測値の一致度を確認します。この検証を通して、本研究で用いた減衰定数の算出式がどの範囲で妥当かを評価します。

以上を踏まえ、次のスライドで本研究のまとめを行います。

ページ 13

目安時間：35秒

本研究のまとめです。

本研究では、BCDR法を用いて高周波基板材料MEGTRON6の実効導電率を広帯域にわたり評価しました。その結果、67ギガヘルツ以下の範囲において、表面粗さの影響により実効導電率が大きく低下することを確認しました。これにより、表面が平滑であると仮定した理想モデルに対して、実際の導体損失はおよそ2.6倍から4.6倍にまで増大することが定量的に明らかになりました。

先ほどの展望で述べました通り、今後はこの実測データをもとに、表面形状の定量化とシミュレーションを組み合わせ、より精度の高い伝送損失予測モデルの確立を目指します。

以上で発表を終わります。ご清聴ありがとうございました。