

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

長野高専 電気電子工学科 5年
春日研究室 柳原魁人

研究の背景

100 GHz帯へ向けた信号減衰の抑制には、
未解明な「表面粗さによる導体損失」の評価が不可欠

社会背景

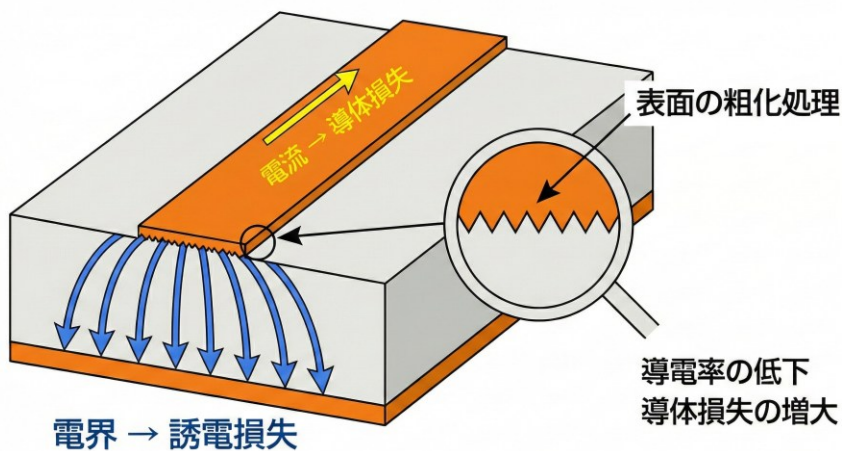
AI、5G/Beyond 5Gの進展
➔ 100 GHz帯の利用へ

技術的課題

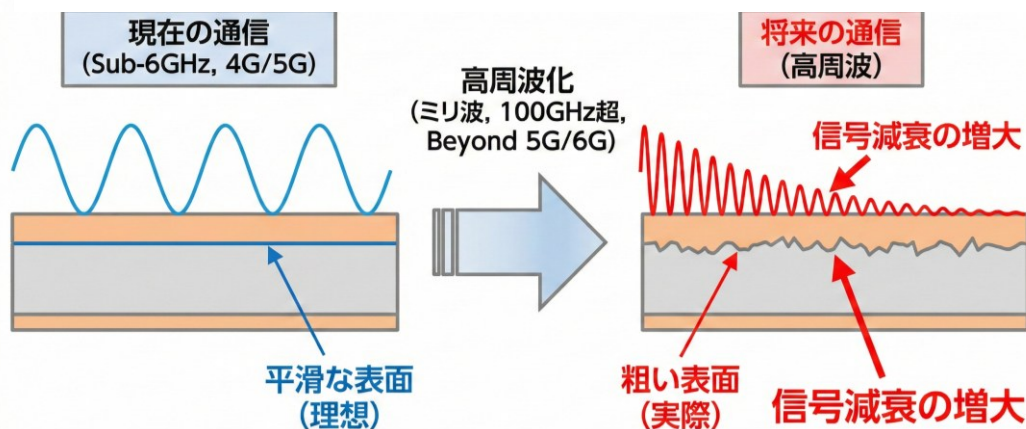
高周波化に伴う信号減衰の増大
(全損失 α = 誘電損失 α_d + 導体損失 α_c)

研究のギャップ

誘電損失 α_d は評価済みだが、
表面粗さによる導体損失 α_c の**定量的データが不足**



損失のイメージ



高周波化のイメージ



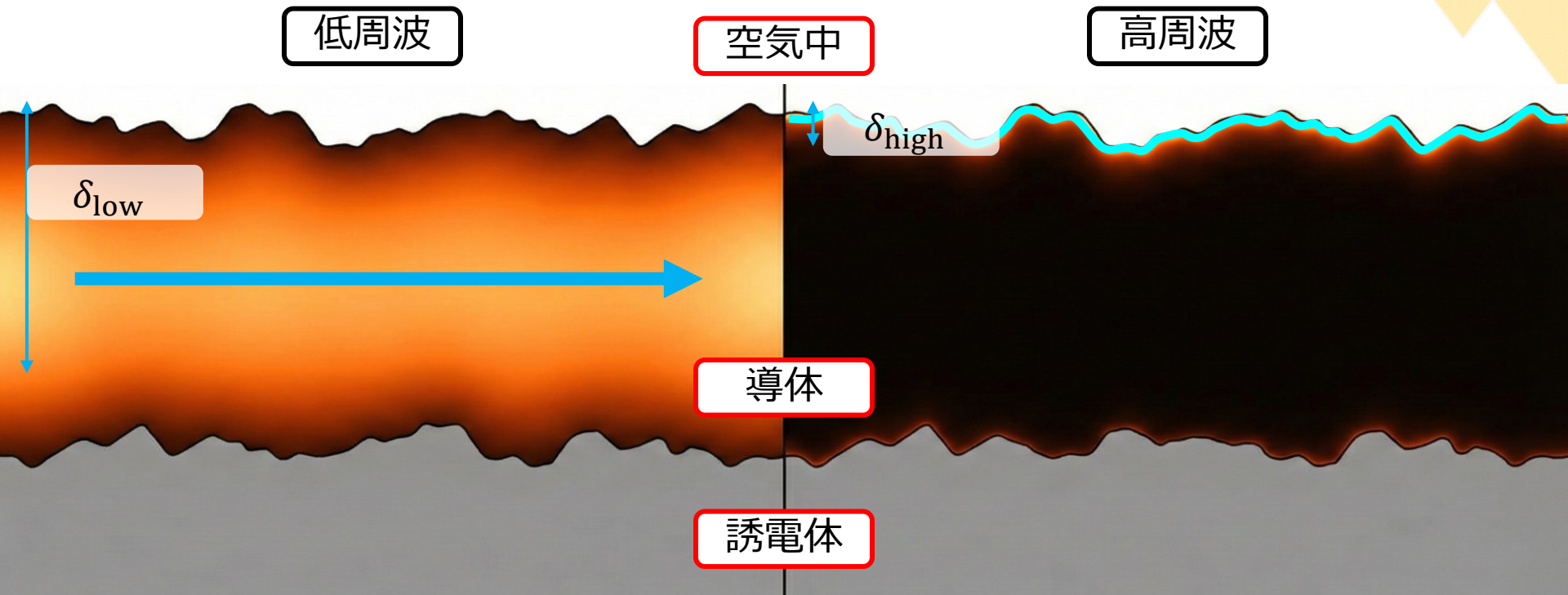
長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

表皮効果と表面粗さの関係

メカニズム：表皮深さが表面凹凸と同等スケールになり、実効的な電流経路が増大する

- 表皮深さ : $\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu \sigma)}$
- δ は3 GHzで約 $1.1\mu\text{m}$, 30 GHzで約 $0.36\mu\text{m}$
→一般的な銅箔の凹凸と同等以下のスケール



本研究の目的

目的

- 表面粗さの影響を含んだ実効導電率を測定し、高周波帯での導体損失を定量的に評価する

具体的な実施内容

- ① **複素誘電率の測定**
BCDR法を用いて MEGTRON6 を測定（10～110 GHz）
- ② **実効導電率の測定**
同一手法で、表面粗さを有する銅箔の導電率を評価
- ③ **減衰定数の算出**
実効導電率から算出 ➡ 実際の信号伝送への影響を評価

※以降の特性評価と考察は、測定が安定する【67GHz以下】にフォーカス



測定対象の材料

次世代通信（5G/6G）に不可欠な低損失基板「MEGTRON6」を評価対象に選定

基板名	メーカー名	公称厚	用途
L-6504C2 (FR-4)	東芝ケミカル	0.3mm	高耐久性、高熱伝導性、 低価格であり、1GHz 以下の帯域でよく使わ れる。
R-5775GH (MEGTRON6)	パナソニック	0.3mm	1GHz以上・高速通 信向け高性能材料。

【選定の理由】

次世代通信への対応: 5G基地局や高速通信機器に採用される高性能材料

評価の必要性: 高周波領域での精密な特性評価が不可欠

手法の整合性: BCDR法は、このような低損失材料の評価に極めて有効

※ FR-4（汎用基板）は先行研究で評価済みのため、今回は対象外



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

BCDR法による測定方法

2段階の測定プロセスにより、樹脂の損失と表面粗さによる損失を分離して評価する

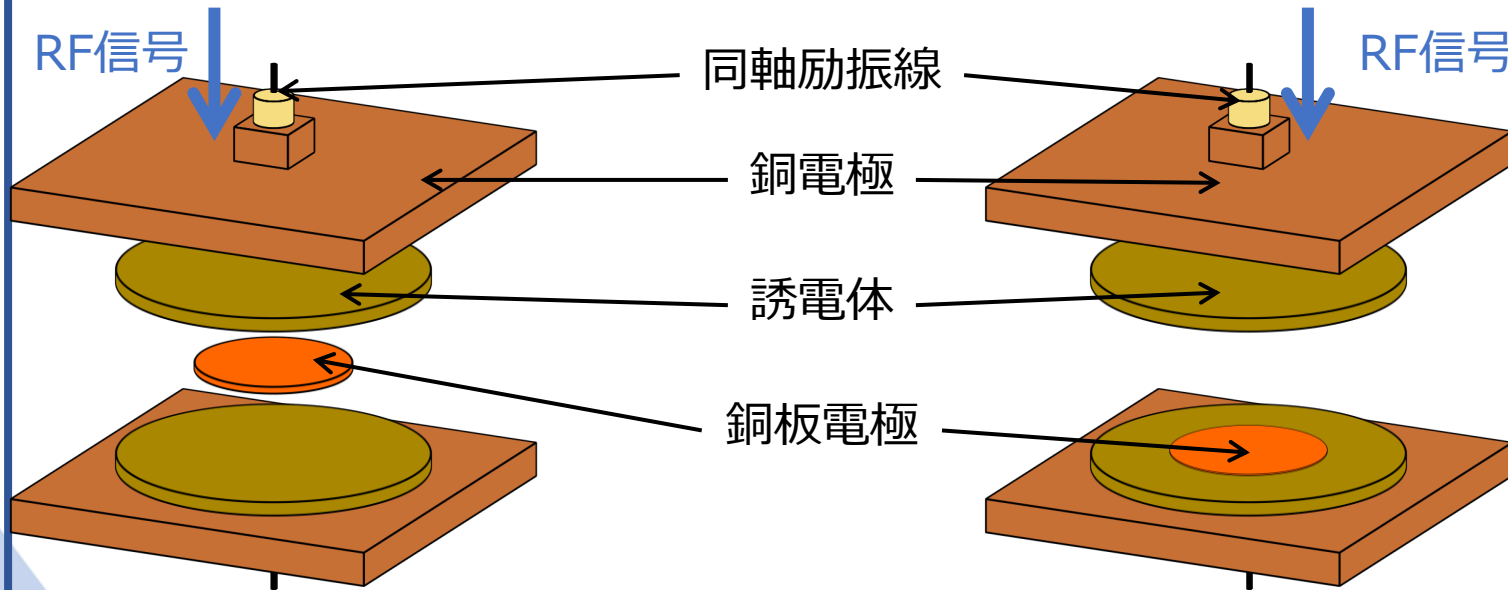
BCDR法（平衡円板共振器法）

誘電体で銅板電極
を挟み、圧着

RF信号入力

共振信号を測定

評価・計算



Step 1 : 基準の測定

平滑な標準銅箔を使用

➡ 基板樹脂の複素誘電率を決定

Step 2 : 表面粗さの評価

実基板の銅箔を使用

➡ Step 1の損失を差し引き実効導電率を算出

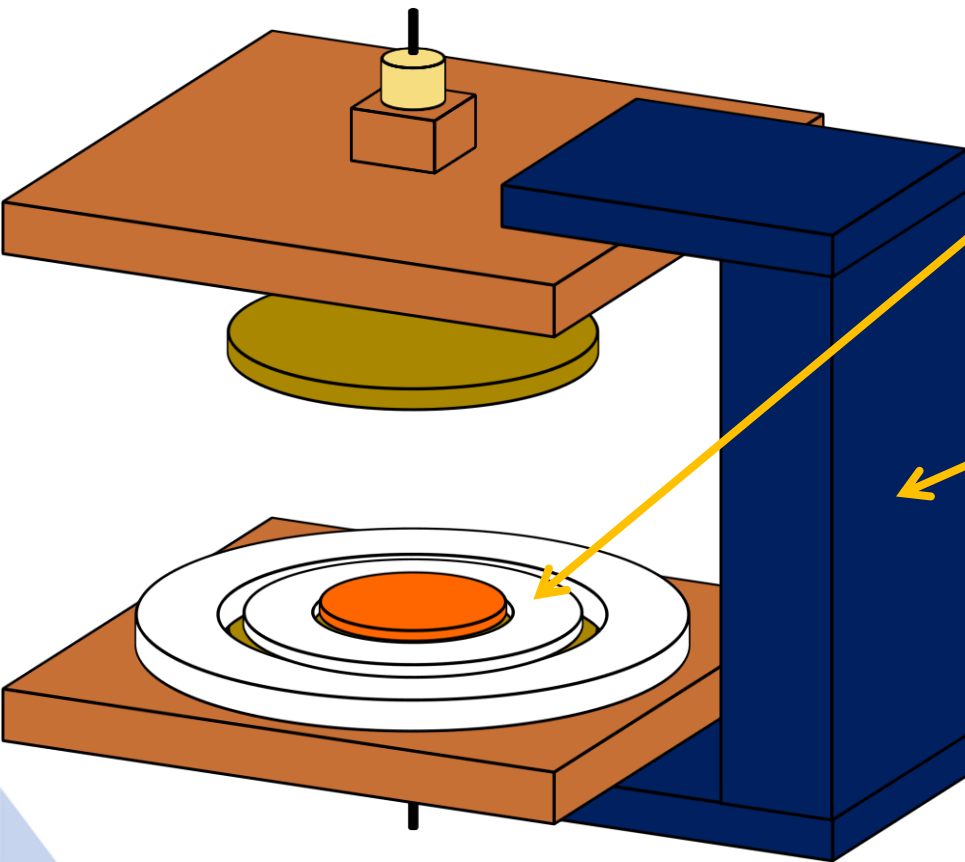


長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

測定精度の担保

目的：ミリ波帯特有の誤差要因（位置ズレ・圧着力のばらつき）を排除



①Shimシート

位置決め用

➡ 円板導体の中心位置を正確に合わせる

②クランプ

圧着力の管理

デジタルトルクレンチ を使用
圧着力を常に一定に保つ

③ 測定前の準備

SOLT校正 の実施

➡ 共振波形の安定を確認してからデータ取得

⚠ 不安定な場合 ➡ ①②からやり直し



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

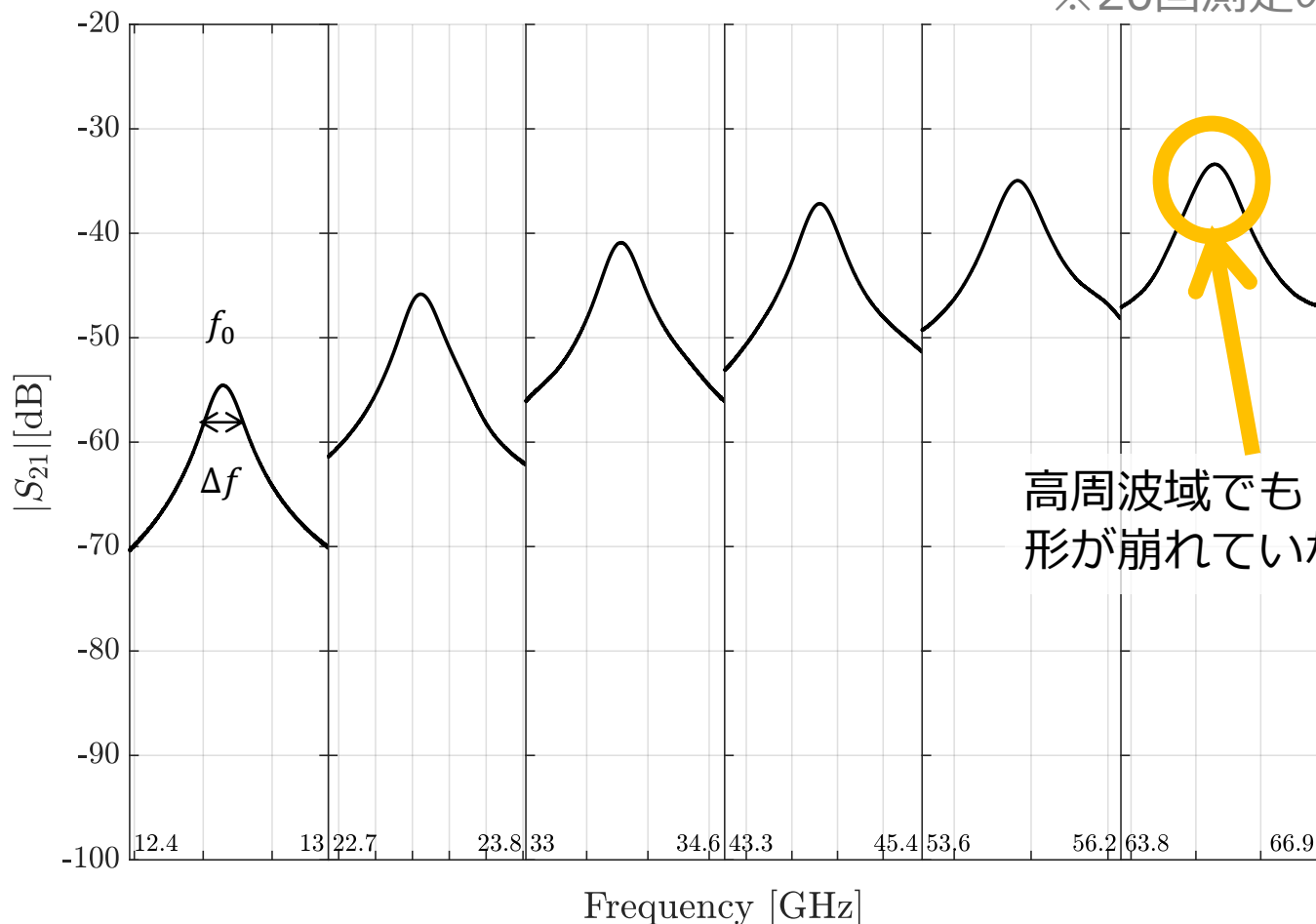
測定結果① Sパラメータ

結論：67GHzまで鋭いピーク（高いQ値）を維持 ➡ 測定は安定・正常

S_{21} Segment Sweep

※20回測定の平均値

$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$
➡ 値が大きいほど損失が小さい



高周波域でも
形が崩れていない

➡ この値を使って次の【複素誘電率】の算出へ

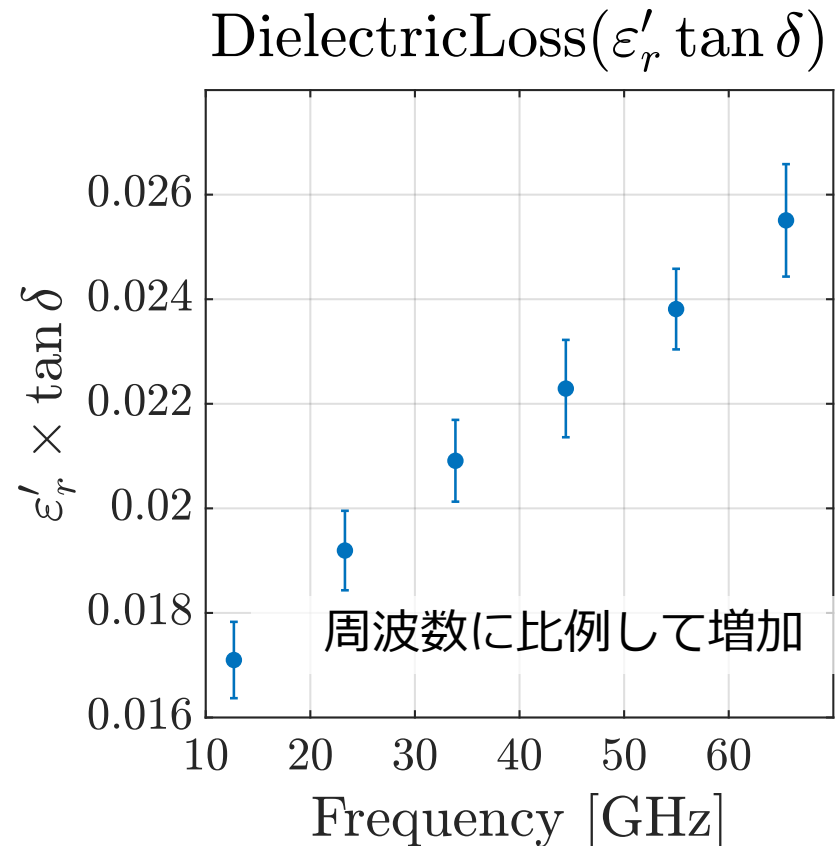
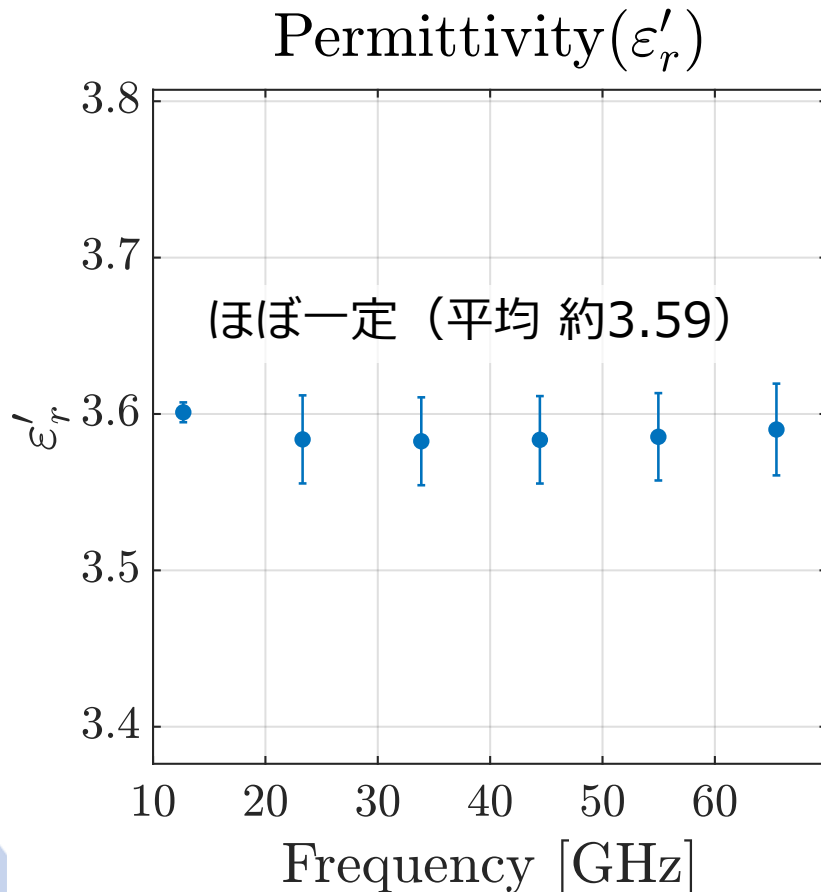


長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

測定結果② 複素誘電率

結論：測定結果は既報の特性と整合 ➡ 本測定手法の妥当性を確認



➡ この値で次の
【実効導電率（表面粗さの影響）】の評価へ

SパラメータのQ値から算出

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon'_r \tan \delta = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$$

$$\tan \delta = K \left(\frac{1}{Q_u} - \frac{1}{Q_c} \right)$$



長野高専 春日研究室

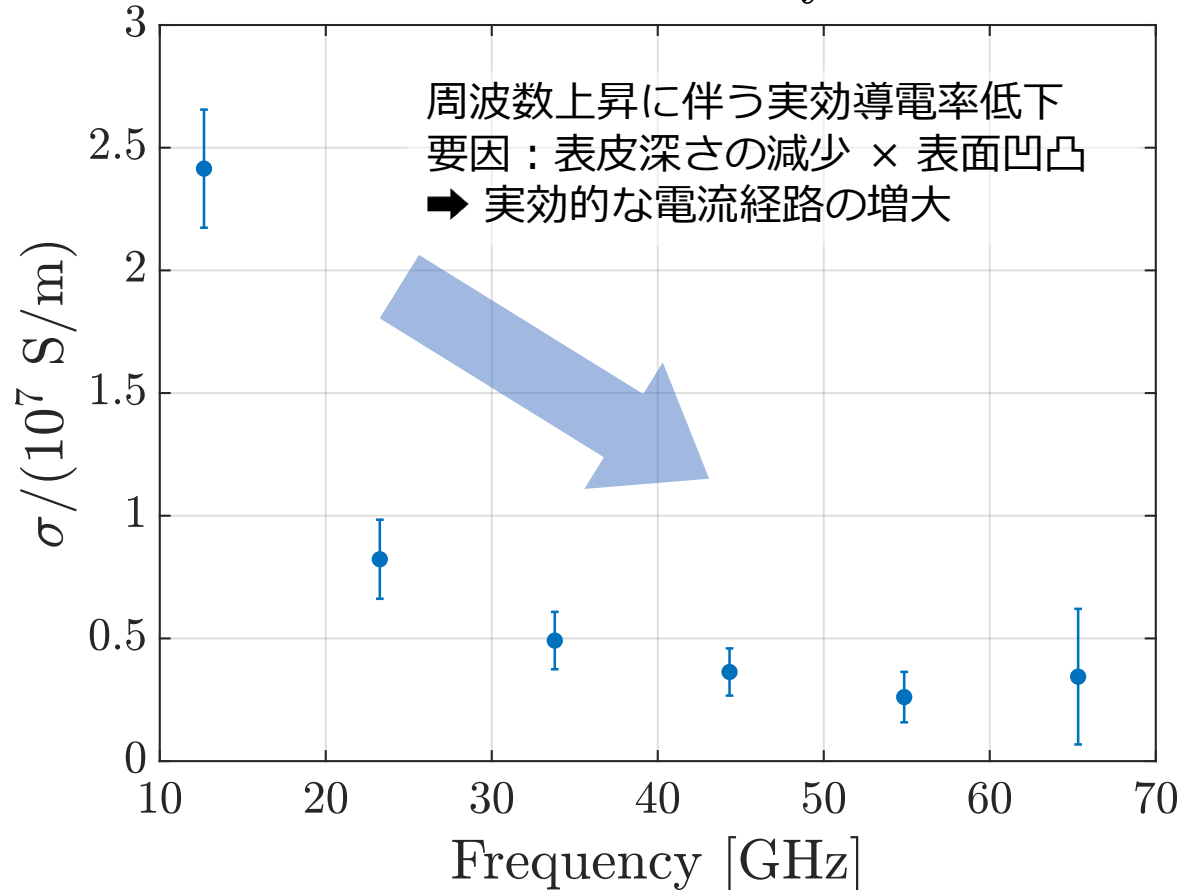
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

測定結果③ 実効導電率

結論：高周波になるほど、表面粗さと表皮効果により実効導電率が大幅に低下する

理想的な純銅の導電率（約 5.8×10^7 S/m）は上方枠外

Conductivity



→ この導電率低下による【実際の信号減衰（導体損失）】の算出へ



長野高専 春日研究室

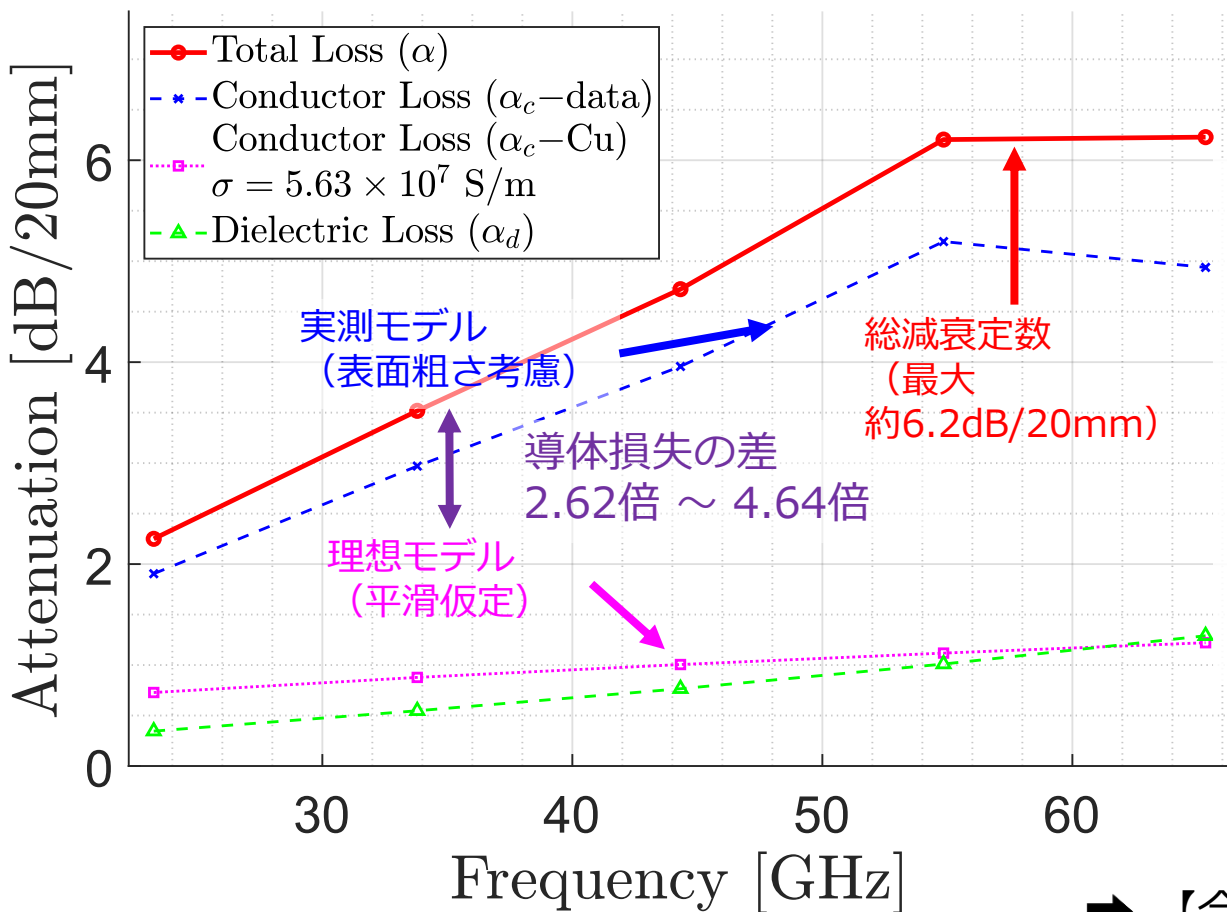
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

減衰定数の算出結果

結論：表面粗さを考慮しない理想モデルは、実際の導体損失を大きく過小評価する

Attenuation Constant Simulation

($W = 0.220$ mm, $H = 0.1000$ mm, $T = 18.0$ μ m)



このような式で実験結果を減衰定数に反映

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

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon'_r + 1}{2} + \frac{\epsilon'_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10H}{W} \right)^{-1/2}$$

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d$$

$$\alpha_c = 0.173 \frac{\sqrt{\pi f \mu_0 \rho}}{Z_0 W} \quad [\text{dB}/20 \text{ mm}]$$

$$\alpha_d = 0.173 \frac{f \pi}{c} \epsilon''_r \sqrt{\frac{\epsilon_{re} - 1}{\epsilon'_r - 1}} \quad [\text{dB}/20 \text{ mm}]$$

➡ 【今後の展望】へ



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

今後の展望

目標：表面粗さによる損失を定量化し、高精度な伝送損失予測モデルを確立する

STEP 1

三次元形状の定量評価

- ・共焦点レーザー顕微鏡を使用
- ・微細凹凸を非接触で測定



STEP 2

導体損失の予測式構築

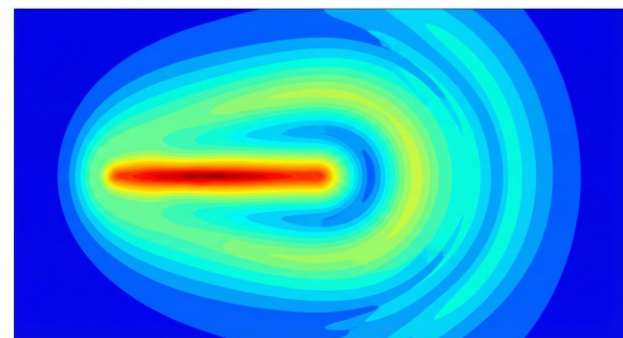
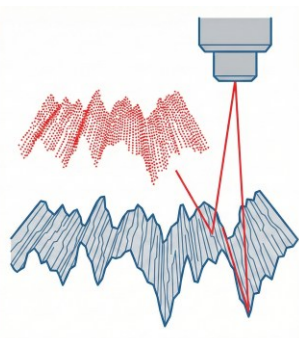
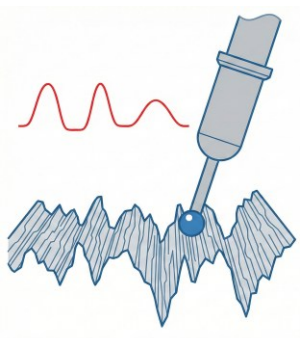
- ・Hurayモデル等へ形状データを適用
- ・物理的な損失予測式を導出



STEP 3

電磁界シミュレーション

- ・FDTD解析等の実行
- ・実測値と予測モデルの妥当性を検証



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

まとめ

結論：高周波帯の回路設計には、表面粗さを考慮した導体損失の評価が不可欠

【得られた成果】

BCDR法でMEGTRON6の実効導電率を広帯域測定
表面粗さの影響により実効導電率が低下することを確認

➡ **導体損失は理想モデルの 2.6倍 ~ 4.6倍 に増加**
(67GHz以下の範囲)

【今後の展開】

表面形状の定量化と、
FDTD解析等による高精度な伝送損失予測モデルの確立

