

# 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

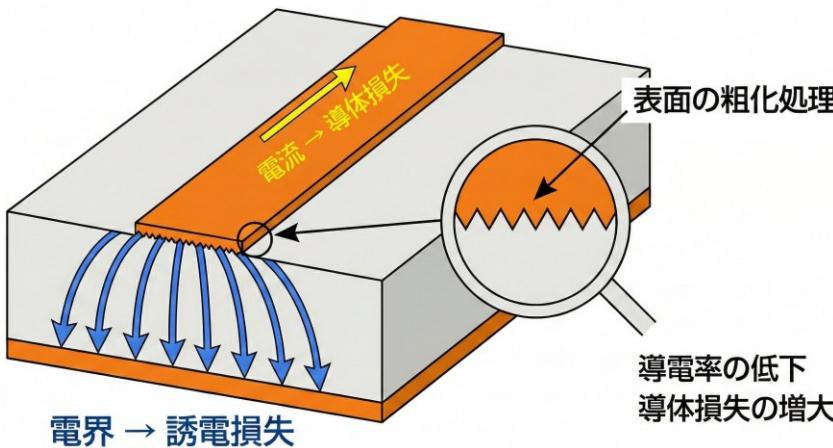
AI、5G/Beyond 5Gの進展  
→ 100 GHz帯の利用へ

## 技術的課題

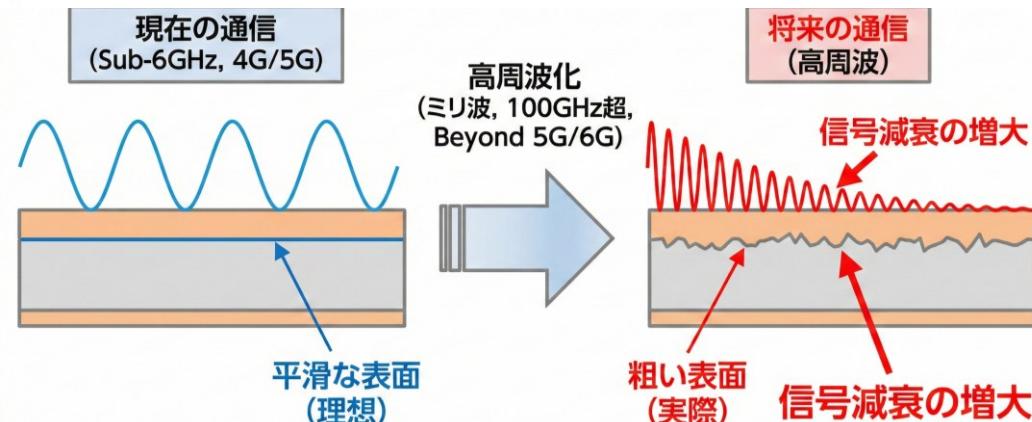
高周波化に伴う信号減衰の増大  
(全損失 $\alpha =$ 誘電損失 $\alpha_d +$ 導体損失 $\alpha_c$ )

### 研究のギャップ

誘電損失 $\alpha_d$ は評価済みだが、  
表面粗さによる導体損失 $\alpha_c$ 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



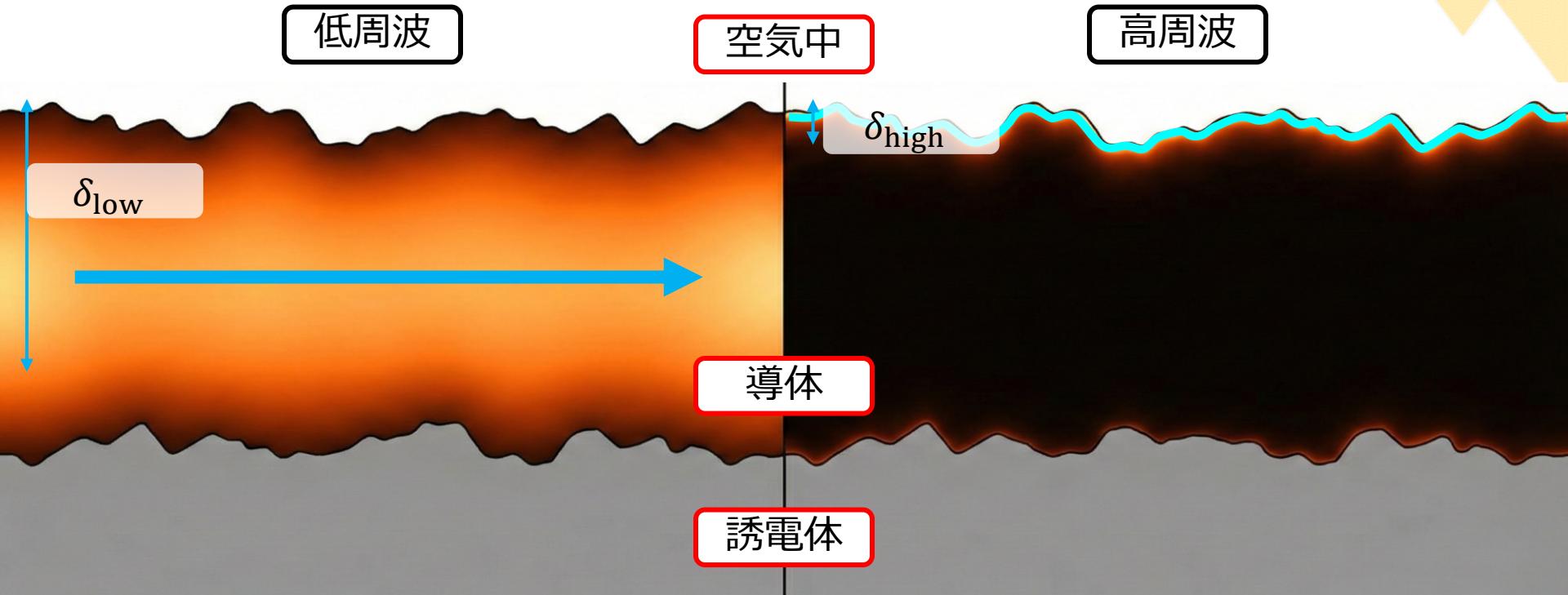
長野高専 春日研究室

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 : $\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu \sigma)}$
- $\delta$ 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



長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

# 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



長野高専 春日研究室

*Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College*

# 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



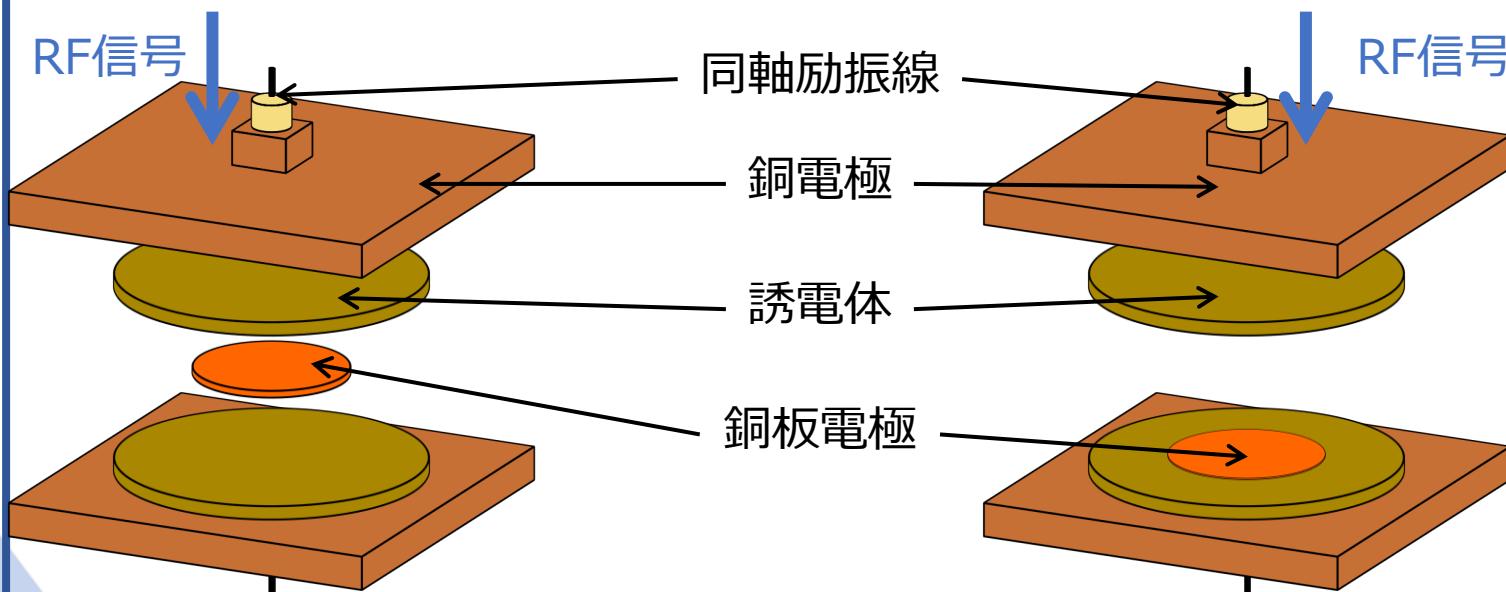
長野高専 春日研究室

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）



### 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

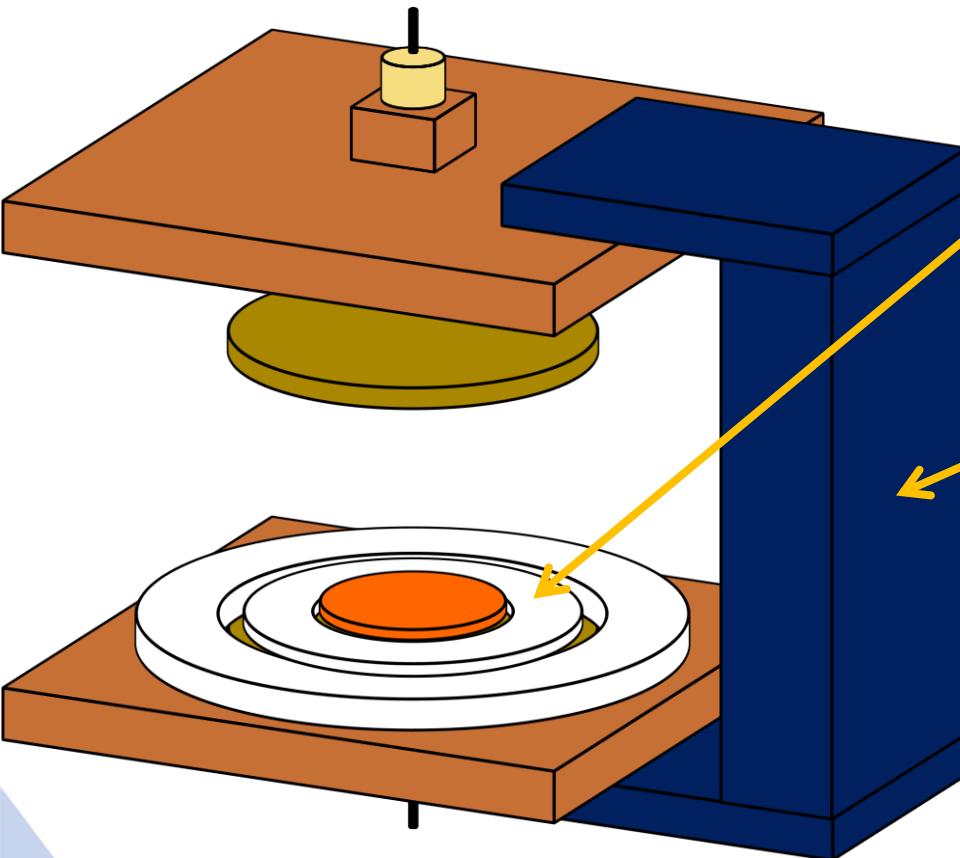


長野高専 春日研究室

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

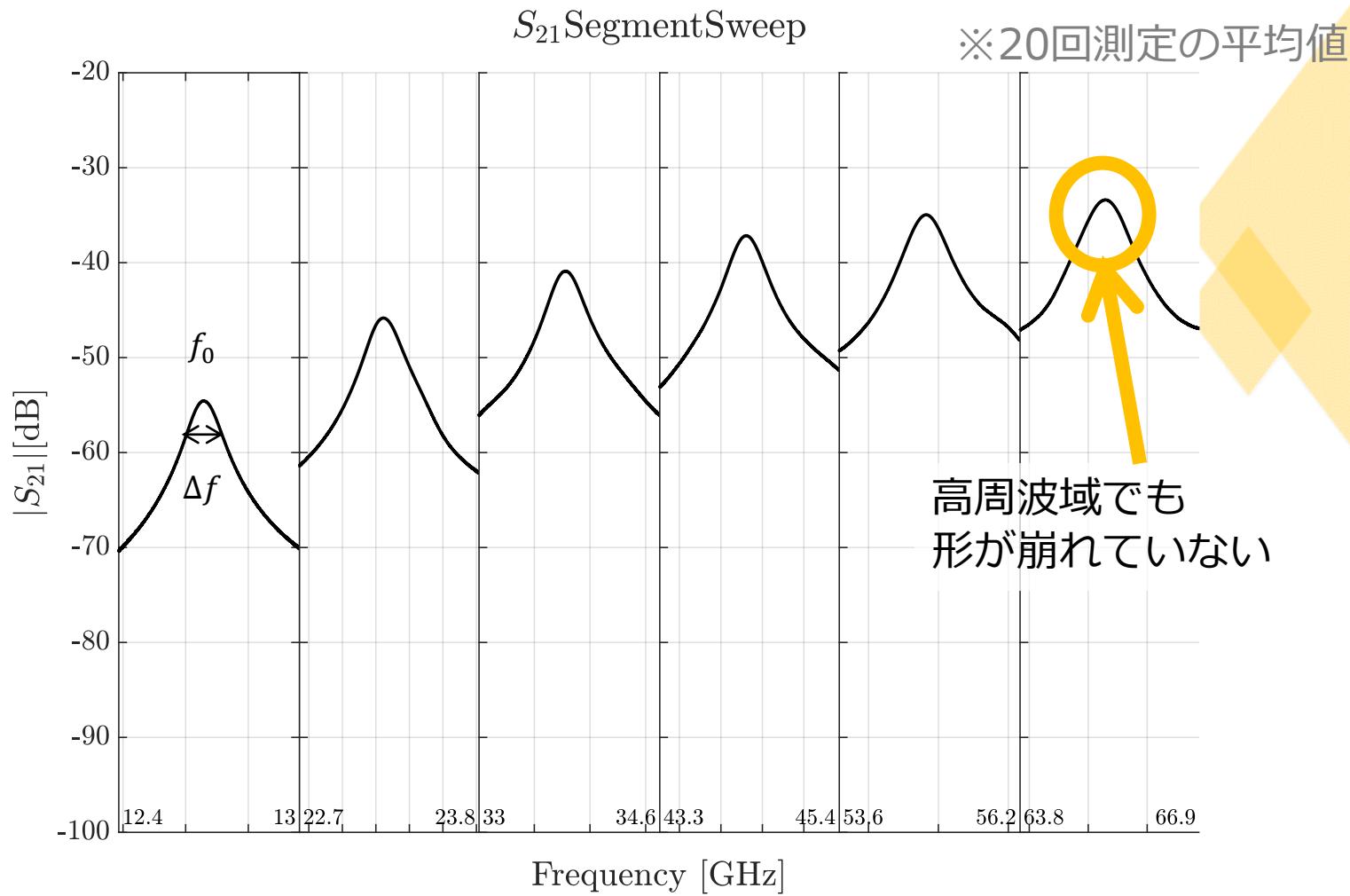
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

# 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

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

→ 値が大きいほど損失が小さい



→ この値を使って次の【複素誘電率】の算出へ



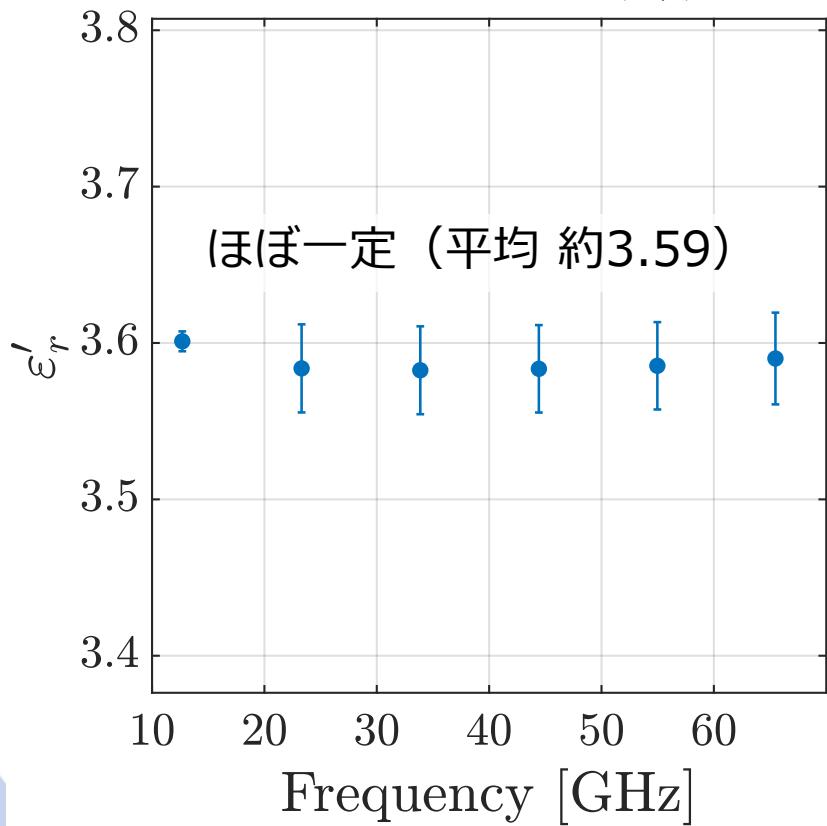
長野高専 春日研究室

Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

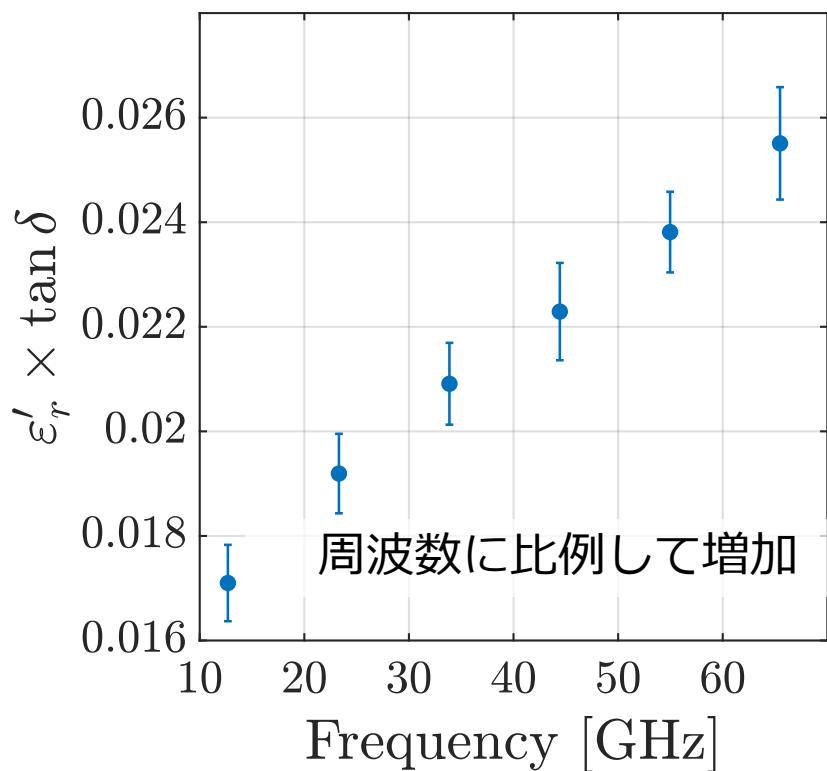
# 測定結果② 複素誘電率

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

Permittivity ( $\epsilon'_r$ )



DielectricLoss ( $\epsilon'_r \tan \delta$ )



→ この値で次の  
【実効導電率（表面粗さの影響）】の評価へ



長野高専 春日研究室

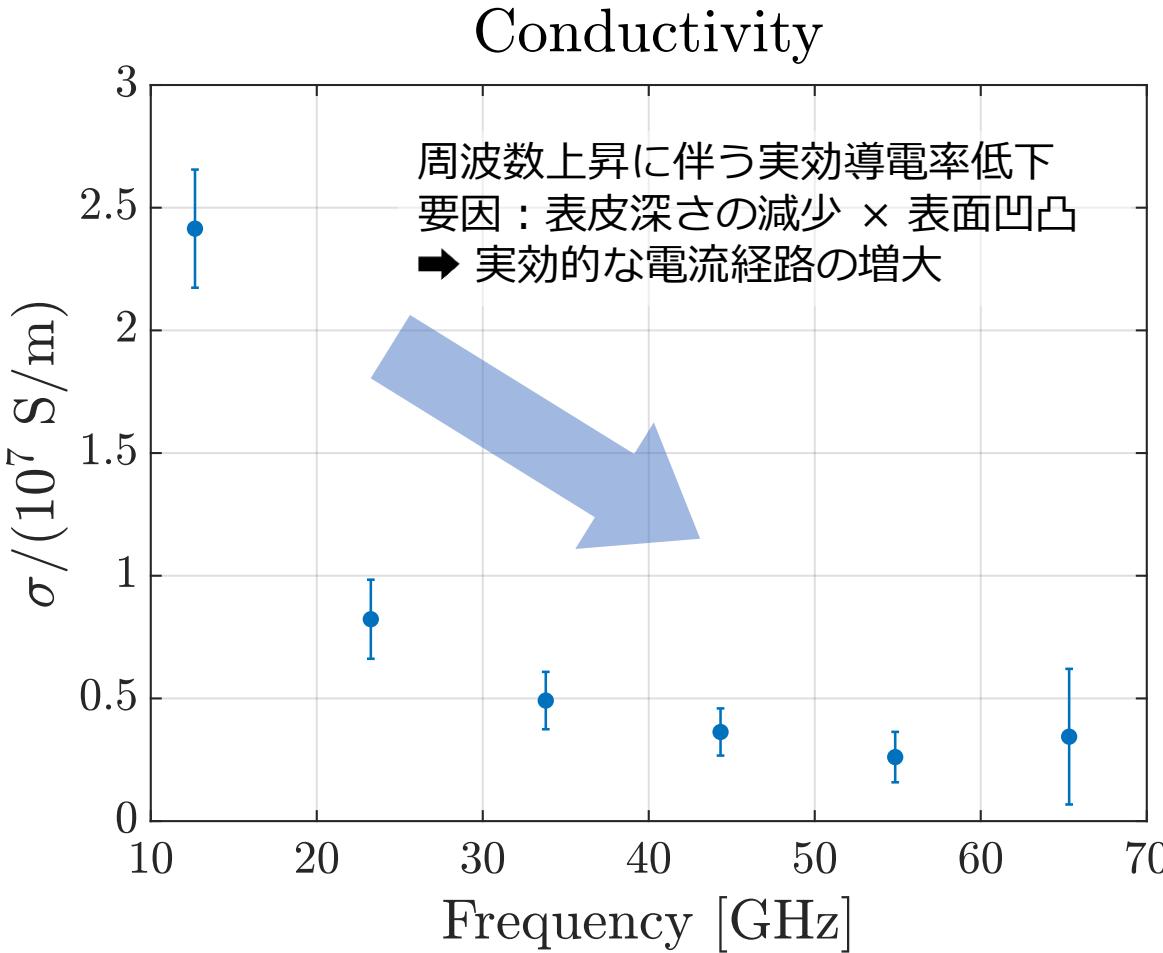
Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College

$$\begin{aligned} S\text{パラメータのQ値から算出} \\ \dot{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon'_r \tan \delta = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \\ \tan \delta = K \left( \frac{1}{Q_u} - \frac{1}{Q_c} \right) \end{aligned}$$

### 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  $5.8 \times 10^7$  S/m）は上方枠外



→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

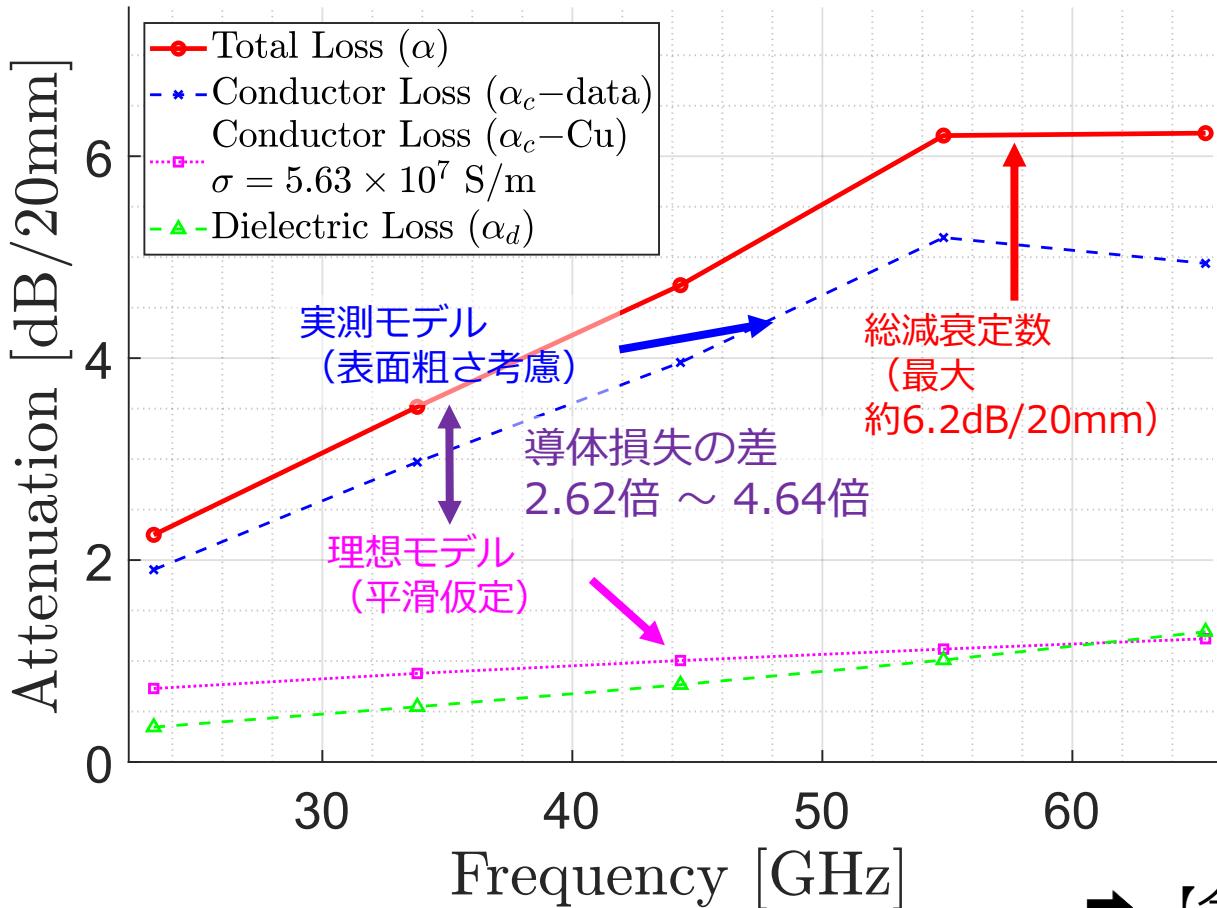
*Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College*

# 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

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



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

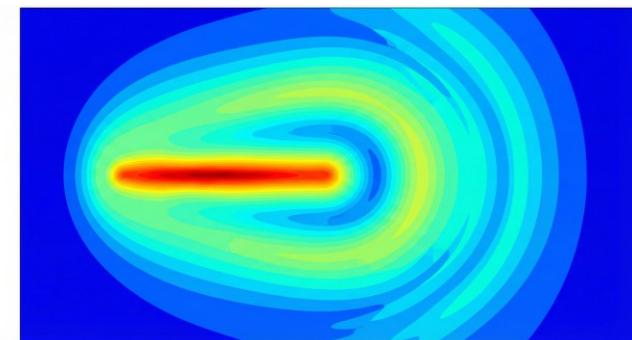
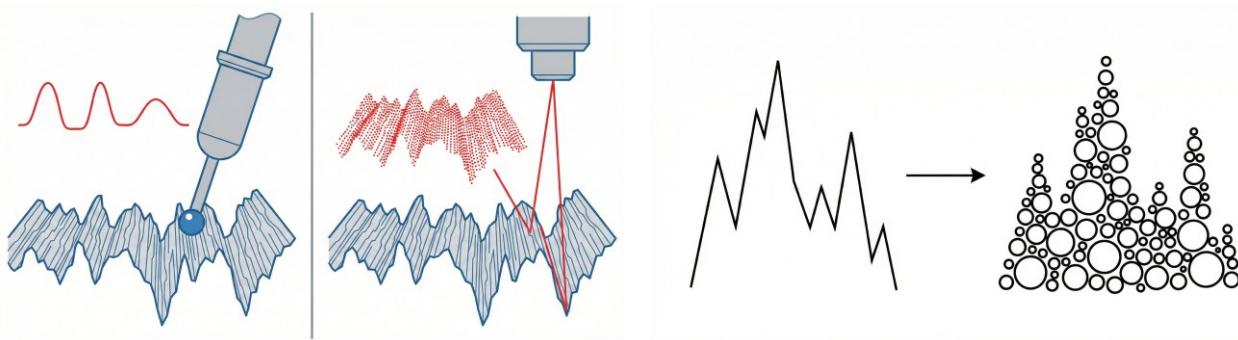
**STEP 1**  
**三次元形状の定量評価**  
・共焦点レーザー顕微鏡を使用  
・微細凹凸を非接触で測定



**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



長野高専 春日研究室

*Kasuga Lab. National Institute of Technology, Nagano College*