

マイクロ波帯における 材料定数測定技術の導入

プロジェクト研究報告会
2006年7月24日
詫間電波工業高等専門学校

情報通信工学科
草間 裕介

1

目次

1. 背景

研究の動機, 学生実験, 誘電率推定の現状

2. 測定系

実験装置, 測定試料, 測定パラメータ

3. 誘電率推定

ニュートン法とチャートの比較

4. まとめ, 今後の予定

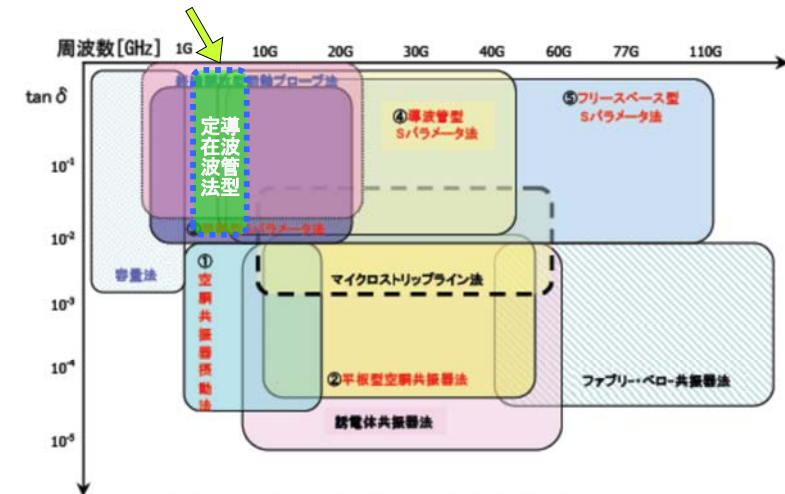
2

背景, 目的

- 学生実験で導波管定在波測定を実習しており, 必要な測定装置が揃っている.
 - 高周波誘電率の基本推定原理を学習する好機会である.
 - Xバンド(8-12 GHz)の適用例が少ない.
- ⇒ **新たに材料定数測定を取り入れた専門学生実験導入を検討する.**

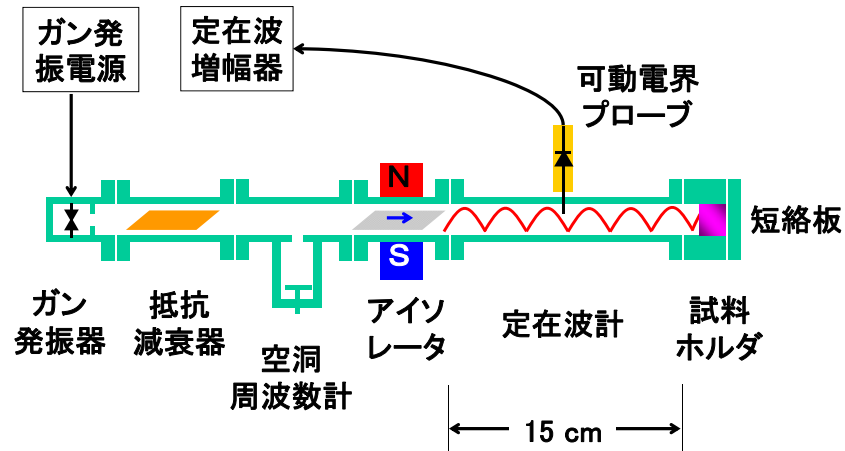
3

誘電率測定技術の現状



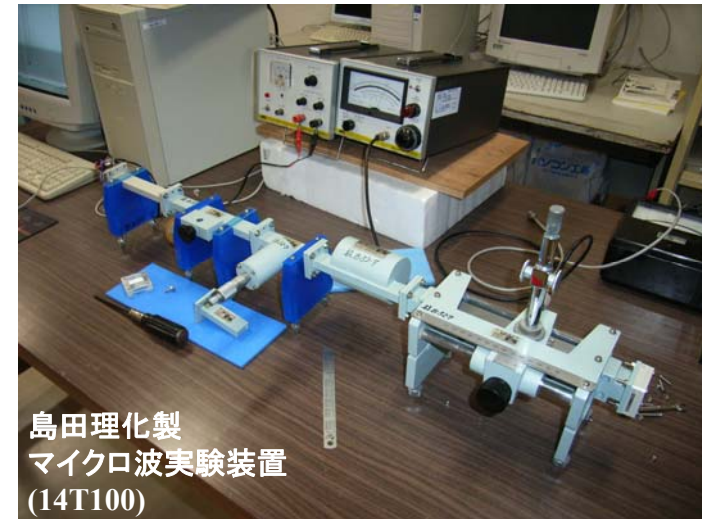
4

測定系



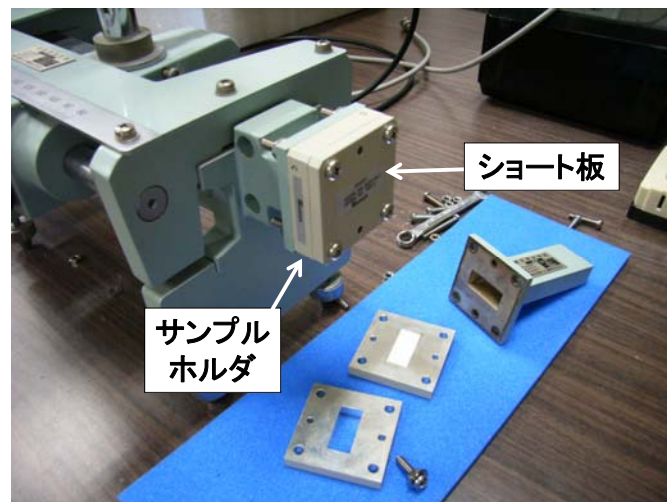
5

測定系



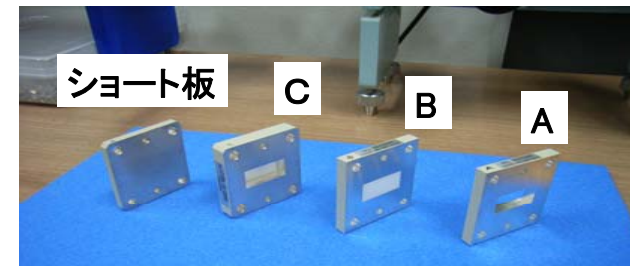
6

サンプルの取り付け



7

サンプル形状

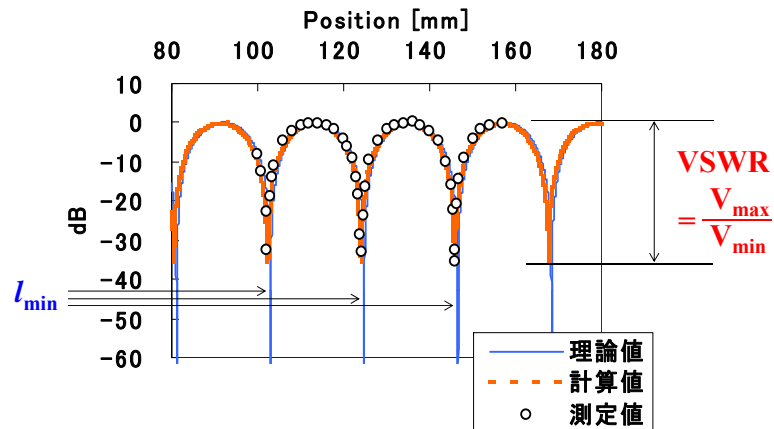


| | ホルダ厚み平均 | サンプル厚み平均 (sin重み平均) |
|---|----------------|-----------------------|
| A | 6.053±0.006 mm | 6.053 mm 空気 |
| B | 6.055±0.005 mm | 5.987 mm テフロン |
| C | 9.009±0.001 mm | 2.991 mm テフロン |

使用マイクロメータ: Mitutoyo 0-25 mm, 分解能 0.001 mm

8

測定パラメータ



ニュートン法による推定

| | 測定 | 理論計算 |
|--------------------|---|---|
| 複素 反射係数 | $\begin{cases} \Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \\ \theta = \pi + 2\beta l_{min} \end{cases} \quad (1)$ | Z_w : 中空導波管の 波動インピーダンス $Z_1(\epsilon)$: サンプル充填導波管の 波動インピーダンス $\gamma_1(\epsilon)$: サンプル充填導波管の 伝搬定数 d : サンプル厚み |
| 正規化 インピー ダンス | $z_m = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (2)$ | $z_c = \frac{Z_1}{Z_w} \tanh \gamma_1 d \quad (3)$ <p style="text-align: center;">← 比較 →</p> |

ニュートン法による推定

| | 測定 | 理論計算 |
|------------|---|---|
| 複素 反射係数 | $\begin{cases} \Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \\ \theta = \pi + 2\beta l_{min} \end{cases} \quad (1)$ | $z_c = \frac{Z_1}{Z_w} \tanh \gamma_1 d \quad (2)$ $\Gamma = \frac{z_c - 1}{z_c + 1} \quad (3)$ |
| | | Z_w : 中空導波管の 波動インピーダンス $Z_1(\epsilon)$: サンプル充填導波管の 波動インピーダンス $\gamma_1(\epsilon)$: サンプル充填導波管の 伝搬定数 d : サンプル厚み |

空気の誘電率

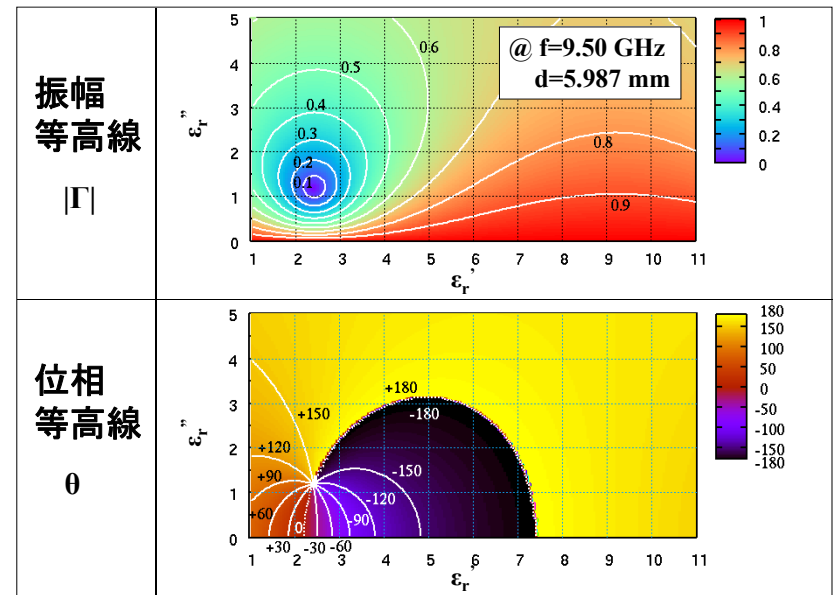
| | ϵ_r' | ϵ_r'' | $ \Gamma $ | θ |
|-------|---------------|----------------|------------|----------|
| 測定値 | 1.234 | 0.039 | 0.97 | 69.36 ° |
| 理論値 | 0.999 | 0.000 | 1.00 | 80.09 ° |
| (参考値) | 1.00 | 0.00 | | |

テフロンの誘電率

| | ϵ_r' | ϵ_r'' | $ \Gamma $ | θ |
|-------|-------------------|---------------------|------------|----------|
| 測定値 B | 解なし | 解なし | 0.92 | -4.33 ° |
| 測定値 C | 2.711 | 0.334 | 0.95 | 118.30 ° |
| (参考値) | 2.04 ~ 3.10 | 0.001 ~ 0.015 | | |

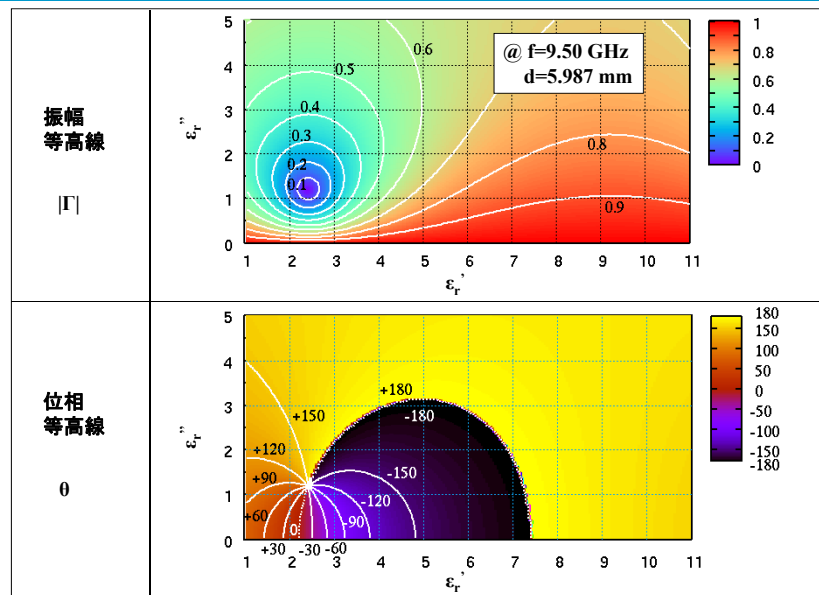
13

チャートによる推定



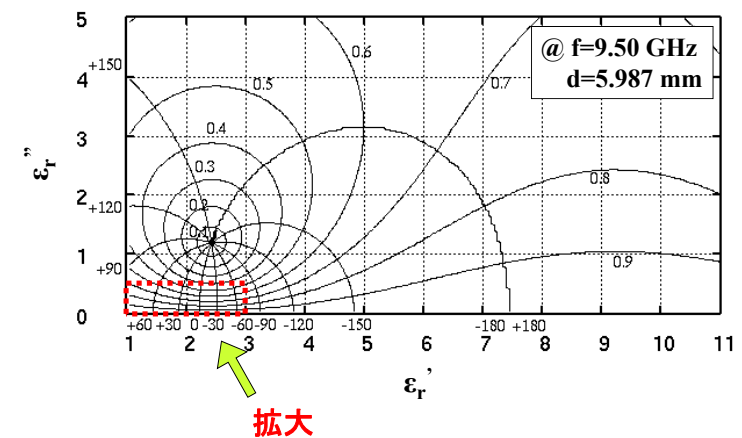
14

チャートによる推定



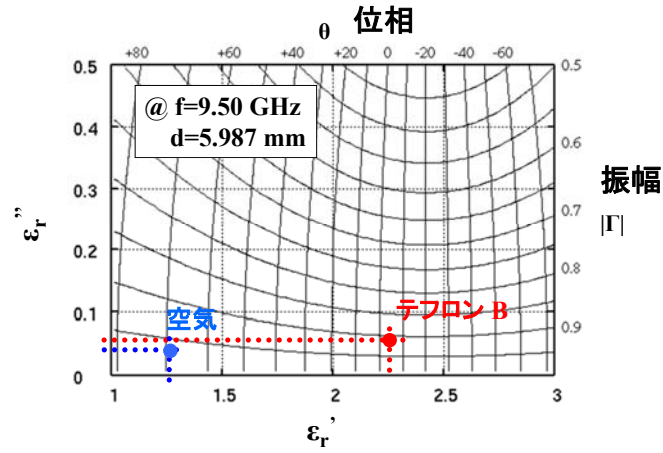
15

誘電率 - 反射係数チャート



16

誘電率 - 反射係数チャート



空気 : 1.27 - j 0.04
テフロン: 2.25 - j 0.06

推定結果の比較

| | ニュートン法 | チャート |
|--------|-----------------|---------------|
| 空気 | 1.234 - j 0.039 | 1.27 - j 0.04 |
| テフロン B | 解なし | 2.25 - j 0.06 |
| テフロン C | 2.711 - j 0.334 | 2.73 - j 0.32 |

(参考値)
テフロン, PTFE $\begin{pmatrix} 2.04 \\ \sim 3.10 \end{pmatrix} - j \begin{pmatrix} 0.001 \\ \sim 0.015 \end{pmatrix}$

推定方法の比較

| | ニュートン法 (デジタル的) | チャート (アナログ的) |
|-------|---------------------------------|-----------------------|
| 解の安定性 | 収束解が得られない場合がある。 (誤差に対して敏感) △ | 必ず解が得られる。 (学生実験向き) ◎ |
| 時間 | 瞬時に解が出る。◎ | チャートの作成に △ 手間がかかる。 |
| 応用 | 透磁率と誘電率の同時推定が可能。◎ | 透磁率と誘電率の同時推定は困難。× |

まとめと今後の方針

- ・ チャート推定を導入することで、学生実験教材導入の見通しを得た。
- ・ 応用性の高いニュートン法の適用は学生実験として不向きである。
- ・ 実験装置の系統誤差の排除、コスト削減を兼ねた装置本体の自作。
- ・ 測定誤差の定量評価。

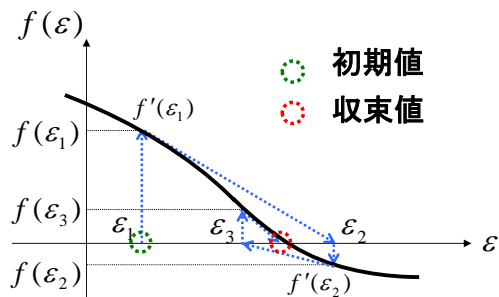
ニュートン法による推定

ϵ_r' ϵ_r''
に関する
連立方程式

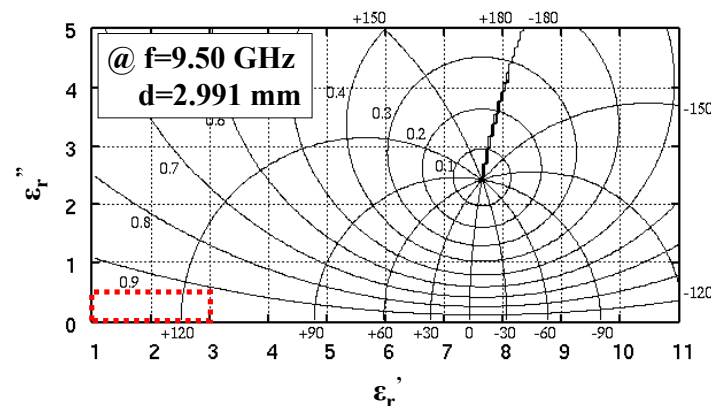
測定値 = 計算値

$$\begin{cases} \text{Re}[z_m] = \text{Re}[z_c(\epsilon_r', \epsilon_r'')] \\ \text{Im}[z_m] = \text{Im}[z_c(\epsilon_r', \epsilon_r'')] \end{cases}$$

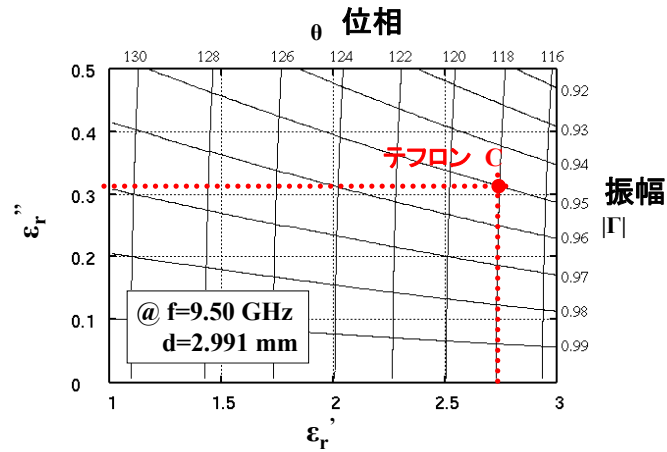
ニュートン
法の概略



誘電率 - 反射係数チャート



誘電率 - 反射係数チャート



テフロン: 2.73 - j 0.32

誤差要因

- ・ ガン発振器の周波数不安定性
- ・ 定在波計の目盛り分解能 (>0.05 mm)
- ・ 表示目盛りの未校正
- ・ プロブ挿入による等価容量
- ・ アイソレータの特性限界 (<30 dB)
- ・ その他...

自作費用見積り

<1セットあたり>

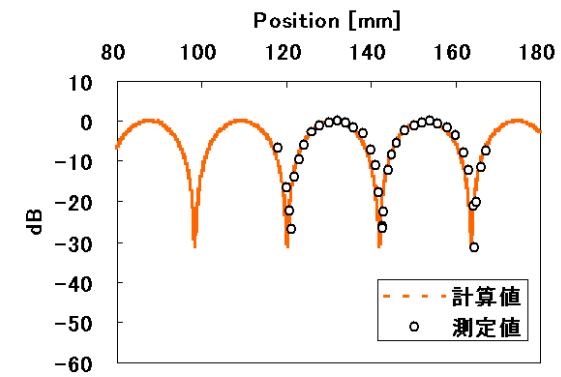
| | |
|--------------|----------|
| ガン発振機 10 GHz | @ 7 千円 |
| スロット導波管 | @ 40 千円 |
| サンプルホルダ | @ 20 千円 |
| ショート板 | @ 10 千円 |
| プローブ | @ 4 千円 |
| RFケーブル | @ 15 千円 |
| LNA | @ 120 千円 |
| 検波器 | @ 100 千円 |

合計 316 千円

ただし、プローブ走査機構等の測定ジグは含まず

25

テフロンの定在波パターン



26