

## 導波管充填法による電波吸収体の材料定数測定

### Measurement of Material Parameters for Electromagnetic Wave Absorber By Using Partly Filled Waveguide

多良 信太郎, 坂田 季之, 堀田 昌志, 羽野 光夫

Shintaro Tara, Toshiyuki Sakata, Masashi Hotta, and Mitsuo Hano

山口大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science & Engineering, Yamaguchi University

#### 1. まえがき

これまでに自然界で存在し得なかったような電磁現象を引き起こすメタマテリアル (Metamaterial) が注目を浴びている。メタマテリアルには、極めて高い誘電率を持った人工誘電体や非磁性体のみで構成できる人工磁性体なども含まれる。

自然界で存在する媒質の誘電率や透磁率の実部は一般的に正の値となる。しかし、メタマテリアルを適切に設計すれば、負の材料定数をもつ媒質も構成可能である。また、バルク型メタマテリアルの多くでは、その材料定数に異方性が表れる事も知られている。

この様なメタマテリアルを実際の素子材料として利用するには、その設計段階でその分散特性を含めた材料定数を明らかにしておく事が重要となる。

本論文では、導波管充填法を用いた未知の材料定数を持つ媒質の誘電率及び透磁率の測定システム構築を目的とする。その準備段階として、材料定数が既知の一般的なプリント基板材料である FR-4 の材料定数測定を行う。次に、複素材料定数を持つ被測定物として、虚部が大きな値を示す電波吸収材料の材料定数測定を行う。

#### 2. 導波管充填法による材料定数の測定原理

図1において、領域1と領域3は誘電率  $\epsilon_0$ 、透磁率  $\mu_0$  を持つ自由空間とする。そして、領域2には複素誘電率  $\epsilon$  及び複素透磁率  $\mu$  を持つ被測定物 (試料) が充填されているものと仮定する。また、導波管内における伝搬モードは  $TE_{10}$  モードのみであるものとする。

この時、領域1及び領域3における波動の伝搬定数  $\beta$  と波動インピーダンス  $Z_0$  は、

$$\beta = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}, \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{\omega \mu_0}{\beta} \quad (2)$$

となる。ただし、 $a$  は導波管開口の横幅、 $\omega$  は電磁界の角周波数である。

次に、領域2での波動の伝搬定数  $\gamma$  と波動インピーダンス  $Z_w$  は、

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - \omega^2 \epsilon \mu}, \quad (3)$$

$$Z_w = \frac{j\omega\mu}{\gamma} \quad (4)$$

となる。式(2)及び(4)より、試料中における波動の規格化波動インピーダンス  $\kappa$  は

$$\kappa = \frac{Z_w}{Z_0} = \frac{j\beta\mu}{\gamma\mu_0} \quad (5)$$

となる[1]。

次に、波動方程式より各領域での電磁界表現式を求め、境界条件を適用して解析を進めると試料における波動の振幅反射係数  $S_{11}$  及び透過係数  $S_{21}$  が次

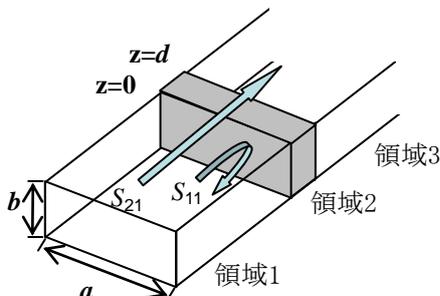


図1 試料を充填した導波管

の様にも求まる。

$$S_{11} = \frac{(\kappa^2 - 1)(\eta^2 - 1)}{(\kappa - 1)^2 \eta^2 - (\kappa + 1)^2} \quad (6)$$

$$S_{21} = -\frac{4\kappa\eta}{(\kappa - 1)^2 \eta^2 - (\kappa + 1)^2} \quad (7)$$

ただし、

$$\eta = e^{-\gamma d} \quad (8)$$

である。

以上の結果を、試料の複素誘電率  $\epsilon$  及び複素透磁率  $\mu$  について解くと、次の関係式が得られる[2]。

$$\mu = \frac{\mu_0}{j\beta d} \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \cosh^{-1} \left( \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \right) \quad (9)$$

$$\epsilon = \frac{1}{\omega^2 \mu} \left( \frac{\pi}{a} \right)^2 - \frac{1}{\omega^2 \mu} \left\{ \frac{1}{d} \cosh^{-1} \left( \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \right) \right\}^2 \quad (10)$$

### 3. 導波管充填法による材料定数測定

#### 3.1 実験系

図2のように、導波管 WRJ-06 の一部に試料を充填した実験系を考える。本論文では、全長  $l=5.0\text{mm}$  の導波管の両端を、同軸 - 導波管変換器を介してベクトルネットワークアナライザ(VNA)に接続する。

ここで、PORT1 及び 2 は導波管と同軸 - 導波管変換器の接続面である。測定開始時の参照面は PORT1 及び 2 となるように VNA を校正している。被測定物となる試料は、導波管の PORT2 と試料の片面が一致するように配置する。ここで試料の PORT1 側を端面 A と呼ぶ。導波管において  $\text{TE}_{10}$  モードのみが伝搬可能である周波数帯域は、 $3.75\sim 7.50\text{GHz}$  なので、測定する周波数帯域は、 $5.0\sim 7.0\text{GHz}$  とする。このような実験系を用いて S パラメータを測定し、その測定値から式(9)及び(10)を用いて、試料の材料定数を計算する。

#### 3.2 位相差の補正

先に述べたように、実験開始時には、同軸-導波管変換器と WRJ-06 導波管の接続部に、S パラメータ測定の参照面を設定している。これでは、測定の参照面と試料の端面が一致していないため、測定した S パラメータと試料における S パラメータには位相差がある。本測定では、試料における S パラメータが必要となるので、位相補正を行う。PORT1 から試

料端面 A までの位相差を  $\theta_1$ 、PORT1 から PORT 2 までの位相差を  $\theta_2$  とする。導波管の全長を  $l$ 、試料の厚さを  $d$  とする。

PORT 1 から試料端面 A までの位相差  $\theta_1$  は

$$\theta_1 = \frac{l-d}{l} \theta_2 \quad (11)$$

と求めることが出来る。

式(11)で求めた位相差  $\theta_1$  を用い測定値を補正した S パラメータを求める。

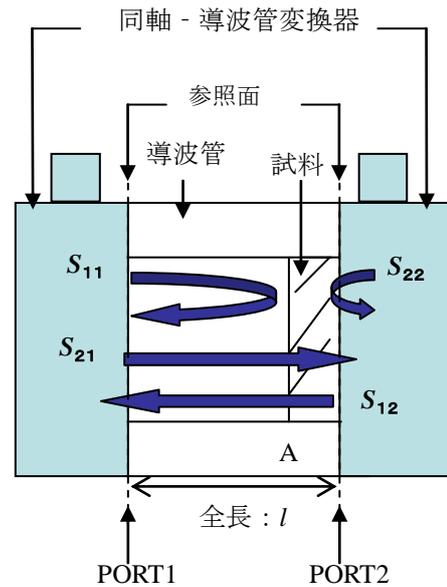


図2 実験系

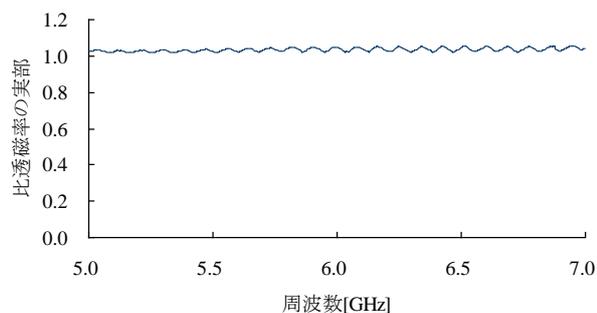
### 4. 測定結果

#### 4.1 FR-4 の材料定数の測定結果

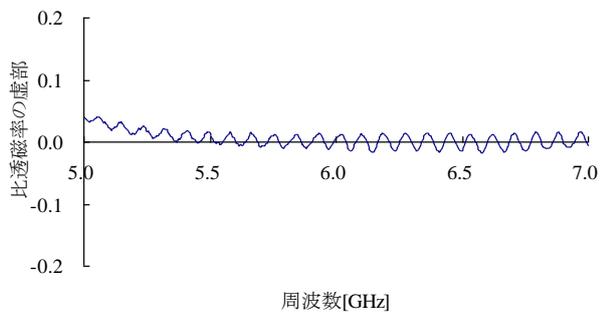
ガラス布基材エポキシ樹脂銅張積層板(FR-4)は材料定数の虚部が小さく、一般的なプリント基板として用いられる材料である。本論文では、材料定数測定法の妥当性を確認するため、先に示した導波管充填法により、FR-4 の材料定数を測定した。その結果を図3及び4に示す。図3は比透磁率、図4は比誘電率の測定結果をそれぞれ示している。

図3(a)より、比透磁率の実部は、1.0 付近で推移している。また、図3(b)より、比透磁率の虚部は、0.0 付近で推移している。FR-4 は非磁性体であるので、比透磁率の測定値は妥当性が確認できる。

図4(a)より、比誘電率の実部は、4.5 付近で推移している。また、図4(b)より、比誘電率の虚部は、0.8 付近で推移している。FR-4 の比誘電率の実部の公称値は、1.0MHz において、4.7 である。また、比誘電率の虚部の公称値は、1.0MHz において、0.075 である。よって、比誘電率の測定値は妥当性が確認できる。

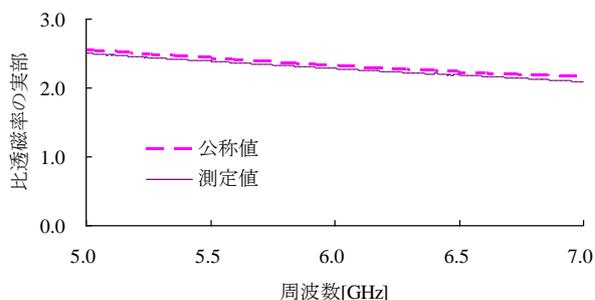


(a) 実部

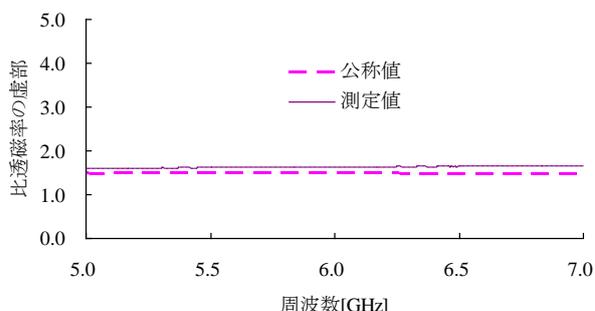


(b) 虚部

図3 FR-4の比透磁率

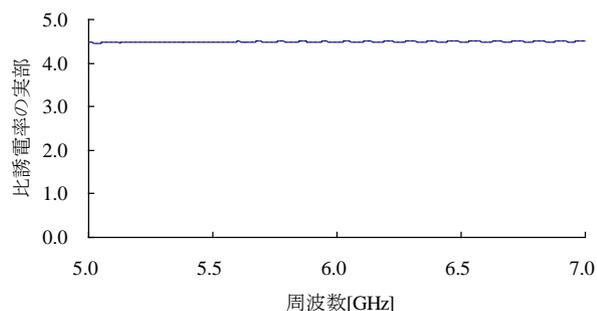


(a) 実部

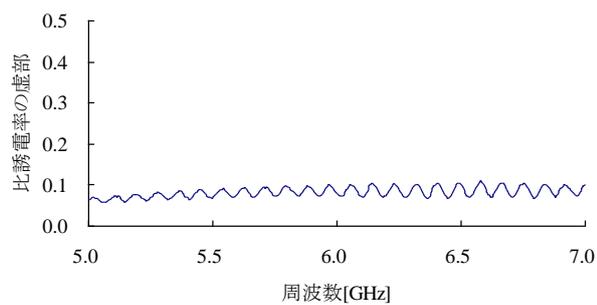


(b) 虚部

図5 SI-58の比透磁率

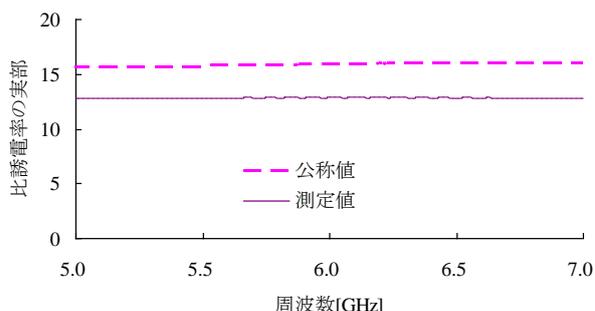


(a) 実部

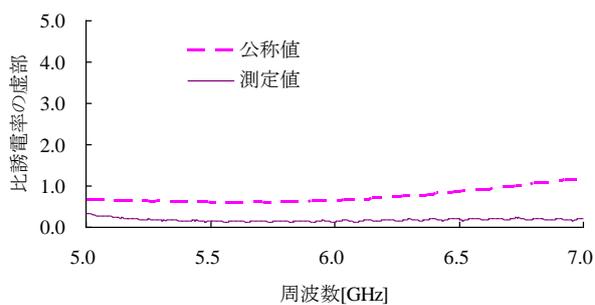


(b) 虚部

図4 FR-4の比誘電率



(a) 実部



(b) 虚部

図6 SI-58の比誘電率

#### 4. 2 電波吸収材料の材料定数の測定結果

次に、材料定数が既知のシリコンゴムと軟質磁性体粒子を混合したシート状の電波吸収材料 SI-58 (株式会社タケチ) の材料定数測定を行った。電波吸収材料 SI-58 は透磁率の虚部が大きいという特性を有している。

先に示した導波管充填法による材料定数の測定法で SI-58 の材料定数を測定すると、図5及び6のような測定結果を得た。なお、図5は複素比透磁率、

図6は複素比誘電率に対する結果である。また、図中には、SI-58 の材料定数の公称値を破線で併記している。

図6(a)より、比透磁率の実部の測定結果は公称値と非常によく一致している。これに対して、図5(a)中の比誘電率の実部、図5(b)中の比誘電率の虚部及び図6(b)中の比透磁率の虚部の測定値と公称値の間には、若干の差異が見られるが、その周波数特性はよく一致している。

## 5. あとがき

本論文では、導波管充填法による材料定数測定法について検討した。材料定数の虚部が小さい一般的な試料である FR-4 の材料定数測定実験では、その材料定数を公称値と同程度に測定できた。電波吸収材料を用いた実際の測定実験でも、若干の差異は見られるが、その材料定数を公称値と同じ特性で測定することができた。よって、本測定法は、分散性を持つメタマテリアルの材料定数測定に利用できるものと期待される。今後は、本測定法の測定精度の向上を検討する。また、本測定法のメタマテリアル材料定数測定への応用及び、異方性の取り扱いについても検討していく予定である。

**謝辞** 研究を進めるにあたり、多大なるご指導、ご助言を頂いた龍谷大学の粟井郁雄教授に深謝する。また、貴重なご助言をいただいた株式会社オリエン

トマイクロウェーブの木田聖治氏に感謝の意を表す。さらに、電波吸収材料を提供いただいた株式会社タケチならびに同社技術部の西内正樹氏に厚く御礼申し上げる。

## 参考文献

- [1] 宮内一洋, 赤池正巳, 石尾秀樹共著「マイクロ波・光工学」, コロナ社, 1989, 第3章.
- [2] T. Ishizaki, S. Kida, and I. Awai, "A measurement method of material parameters for uniaxially anisotropic artificial dielectrics", *IEICE Electronics Express*, vol. 7, no.11, pp.810-816, 2010.