

電波吸収量の角度特性を利用した材料定数の推定に関する研究

上野大介* 戸枝保*

Study on Measurement of Permittivity and Permeability by the Angle Characteristic of Electromagnetic Wave Absorber Measurement

UENO Daisuke*, TOEDA Tamotsu*

抄録

自由空間法により電波吸収量測定した結果を準ニュートン法による逆推定計算することにより材料定数推定の検討を行った。試料の裏面に金属板を置いた場合と置かなかった場合の両方を測定したところ複素比誘電率および複素比透磁率を 1 ~ 6GHz における連続周波数で求めることができた。サンプリングポイント数を適切な値にすることによりタイムゲート処理の際に高周波まで安定した結果が得られた。また、その結果を共振器法および導波管法の測定結果と比較することにより精度を確認した。

キーワード：電磁波吸収体，誘電率，透磁率，材料定数，タイムゲート処理，磁性シート

1 はじめに

近年、我々の身の回りの電磁波利用が急増しており、EMC 対策などで使用する電波吸収体や磁性シート等の研究・開発が盛んに行われている。

材料の電磁的な性能を確保するために材料定数を制御する必要があるが、その測定が極めて重要なものとなってきている。GHz 帯の材料定数の測定法には、大きく分類すると導波管法、共振器法、自由空間法があるが¹⁾、材料の電波吸収特性（反射係数）は材料定数及び構造から定まり、逆に吸収特性から材料定数を逆推定計算することができる。センターでは、後述の図1の装置を用いた自由空間法吸収特性測定が可能のため、この結果を逆算することにより材料定数推定を検討した。

2 実験方法

2.1 測定系

使用した機器を表1に、角度特性の自動測定装置を図1に示す。ベクトルネットワークアナライザを VNA と表記する。アンテナ測定物間距離は 100cm とした。反射体は電波吸収体と同じ大きさで 2mm 厚のアルミ板を使用した。

表1 使用機器

品名	メーカー	品番
アンテナ	SCHWARZBEC	BBHA9120B
ケーブル	HUBER+SUHNER	SUCOFLEX
VNA	Agilent	8753ES

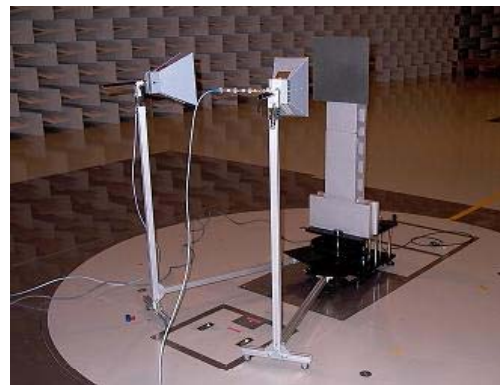


図1 角度特性の自動測定装置の外観

表1の VNA はタイムドメイン機能がないが、測定結果の位相情報を用いて到達時間の差として

* 電子情報技術部

分離するタイムゲート処理を PC 上で行った²⁾。

2.2 測定方法

図2のように、入射電磁波の電界が入射面に垂直な場合である TE (Transverse Electric) 波及び、入射電磁波の電界が入射面に水平な場合である TM (Transverse Magnetic) 波の電波を入射角 θ で試料に送信し、その時の反射波の複素反射係数 $\dot{\Gamma}$ を測定し、その値から材料定数 (複素比誘電率を $\dot{\epsilon}$ 、複素比透磁率を $\dot{\mu}$ と表記する) を逆推定計算する³⁾。

逆推定計算手法は各種あるが、本研究では準ニュートン法を用いた。これは最急降下法の大域的収束性とニュートン法の局所的に速い収束性というそれぞれの長所をあわせもつためである⁴⁾。

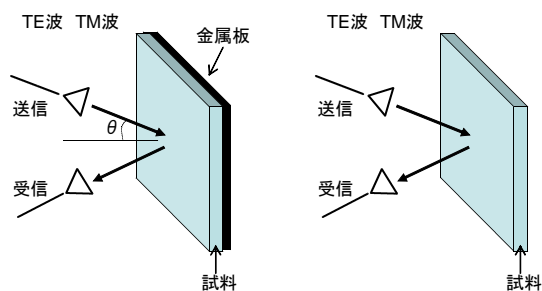


図2 自由空間反射法の概要

2.3 理論式

2.1 の測定条件のとき、試料内部における伝搬定数の反射面に対する垂直成分 $\dot{\gamma}$ は、以下のように表すことができる。

$$\dot{\gamma} = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\dot{\epsilon}\dot{\mu} - \sin^2 \theta} \quad (1)$$

試料の厚さが d のとき、試料の裏面に金属板がある場合の $\dot{\Gamma}$ は

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{R} - e^{-2\dot{\gamma}d}}{1 - \dot{R}e^{-2\dot{\gamma}d}} \quad (2)$$

試料の裏面に金属板が無い場合の $\dot{\Gamma}$ は

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{R}(1 - e^{-2\dot{\gamma}d})}{1 - \dot{R}e^{-2\dot{\gamma}d}} \quad (3)$$

式中の \dot{R} は TE 波および TM 波について、それぞ

れ以下のように表すことができる。

$$\dot{R}_{TE} = \frac{\dot{\mu}\sqrt{1 - \sin^2 \theta} - \sqrt{\dot{\epsilon}\dot{\mu} - \sin^2 \theta}}{\dot{\mu}\sqrt{1 - \sin^2 \theta} + \sqrt{\dot{\epsilon}\dot{\mu} - \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

$$\dot{R}_{TM} = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}\dot{\mu} - \sin^2 \theta} - \dot{\epsilon}\sqrt{1 - \sin^2 \theta}}{\sqrt{\dot{\epsilon}\dot{\mu} - \sin^2 \theta} + \dot{\epsilon}\sqrt{1 - \sin^2 \theta}} \quad (5)$$

2.4 測定試料

本研究で測定した吸収体の配合を表2に示す。寸法は 350mm × 350mm であり、これらの測定試料は(株)サンケイ技研で開発したゴム製単層吸収体である²⁾。

表2 配合 (phr)

材料名	メーカー	配合
EP33	JSR	100
酸化亜鉛	境化学工業	5
ステアリン酸	-	1
アクセルCZ	川口科学	2
アクセルBZ	川口科学	0.2
硫黄	境化学工業	1.5
PW-90	出光興産	10
ファインメット	日立金属	-
FE50Ni	戸田工業	100
計		219.7

3 結果と考察

3.1 逆推定に必要な条件の検討

3.1.1 測定条件

$\dot{\epsilon}$ と $\dot{\mu}$ は複素数で表されるため未知数は4つ存在する。このため、材料定数を逆推定するには、測定から得られるパラメータが少なくとも4つ必要となるため、測定条件を変えて2回以上の測定を行う必要がある。本研究では変化させる測定条件として偏波、試料の裏面条件、入射角の3つに着目し検討を行った。偏波は TE 波及び TM 波で、裏面条件は試料裏側の金属板有無で、入射角度は 60,50,40,30,20,10 度で条件を変化させた。

3.1.2 検討結果

偏波や入射角度を変化させても推定計算は一定の値に収束しなかった。すなわち、偏波や入射角度は4つの値を決定づける実験条件ではなかったといえる。

そこで、図2のように裏面条件を変えた測定を行ったところ、図3のように一定の値に収束した

ので、3.2 以降の測定は裏面条件を変化させることにした。

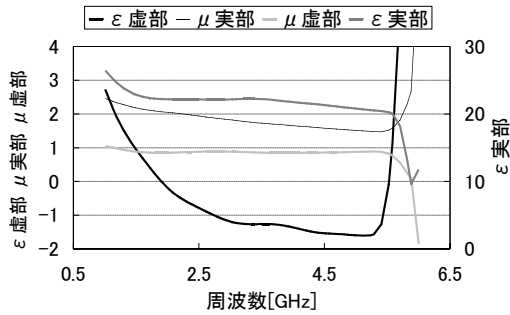


図3 材料定数推定結果

3.2 タイムゲート処理の向上

図3の 5.5GHz 以上では安定した結果が得られていない。これは吸収量が正しく測定されていないためと思われる。

この原因を検討したところ、最大周波数付近では、タイムゲート処理におけるサンプリングのタイミングが、正弦波のピーク付近で連続する部分と零点付近で連続する部分、といった偏りが生ずるためゲーティングにより時間軸上の一部を取り出した場合、信号強度の誤差となっていることがわかった。

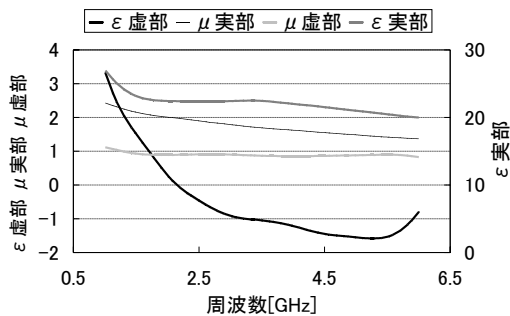


図4 高周波を改善した結果

金属板単体での反射波と吸収体からの反射波では位相が異なるため、この偏りの時間軸上での位置も異なり、金属板と吸収体の比から求める反射係数も大きな誤差を含んでしまう。サンプリングを最大周波数の4倍とし、零点付近が連続することを防止することにより、この誤差を無くすことができ、電波吸収量測定も安定した推定ができるようになった。この測定結果から材料定数を推定した結果を図4に示す。図3に比べ高周波まで安定して材料定数を求めることができた。

3.3 測定精度確認

3.2.1 他の測定法との比較

測定精度確認のため青山学院大学で共振器法および導波管法の測定を行った結果を表3に示す。

表3 他の測定法との比較

2.0GHz	誘電率	透磁率
本研究の手法	22.44-0.24j	2.00-0.89j
共振器法	22.80-1.64j	2.39-0.69j
5.8GHz	誘電率	透磁率
本研究の手法	20.15+1.18j	1.38-0.87j
導波管法	20.39-0.65j	1.74-0.92j

共振器法と導波管法の測定結果と自由空間法の結果が誘電率虚部を除いてほぼ一致した。

3.2.2 誘電率虚部の差異について

誘電率虚部を図5のように変化させても反射係数は少ししか変わらず、表2の試料は磁性電波吸収材料といえる³⁾。よって、反射係数のわずかな測定誤差が誘電率虚部の大きな誤差になったものと考えられる。

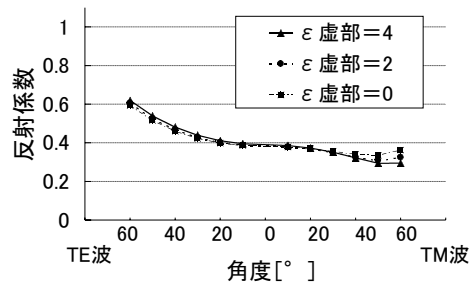


図5 反射係数の角度特性 本研究の試料

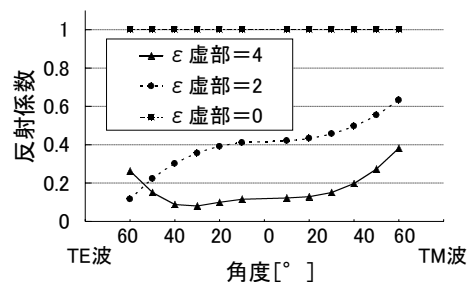


図6 反射係数の角度特性 理論的試料

比較のため、理論的な誘電性電波吸収材の材料定数を求め、誘電率虚部の値を変化させた反射係数の変化を図6に示す。反射係数が大きく変化したので、このような材料では逆算で大きな誤差は生じないと考えられる。

よって、反射係数から逆計算で求める本研究の手法では反射係数にあまり影響しないパラメータ

一の正確な推定は難しいが、そもそも電波吸収体の設計には重要でないパラメータともいえる。

4. まとめ

センターの電波暗室において自由空間反射法による材料定数測定について検討したところ、次のようなことが分かった。

(1) 逆推定に必要な条件を検討し、偏波を変化させても、入射角度を増やしても一定の値に収束しなかったが、裏面条件を変えた測定を行ったところ収束した。これにより単相電波吸収体の材料定数の推定が 1GHz ~ 6GHz の帯域において可能となった。

(2) 最大周波数付近では、ゲーティングにより時間軸上の一部を取り出した場合、信号強度の誤差となっていることがわかった。

サンプリングを最大周波数の4倍とし、零点付近が連続することを防止することにより、この誤差を無くすことができ、電波吸収量測定も安定した推定ができるようになり、高周波まで安定して材料定数を求めることができた。

(3) 2GHz と 5.8GHz において共振器法と導波管法の測定結果と自由空間法の結果が誘電率虚部を除いてほぼ一致した。測定試料が磁性電波吸収材料だったため、反射係数にあまり影響しないパラメーターの正確な推定は難しい。よって、誘電率虚部のがずれたと考えられる。しかしながら、電波吸収体を作成するための材料定数測定精度は確認をすることができた。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、当センターの客員研究員として御指導を頂いた、青山学院大学工学部橋本修教授、同研究室博士課程の土井亨氏、測定試料を提供いただいた株式会社サンケイ技研の皆様に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 橋本修：電波吸収体入門, 森北出版, (1997) 78
- 2) 上野大介, 戸枝保, 土生拓史：電波暗室を利用した電磁波吸収体測定技術に関する研究, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, 3, (2005) 57
- 3) 橋本修：高周波領域における材料定数測定法, 森北出版, (2003) 117
- 4) 矢部博：工学基礎最適化とその応用, 数理工学社, (2006) 156
- 5) 清水康敬：最新電磁波の吸収と遮蔽, 日経技術図書株式会社, (1999) 88