

# 電波吸収体の材料定数測定システムの開発

杉浦宏和\* 吉村慶之\* 橘泰至\* 西田斉\*\*

電波を用いたデータ通信技術が広く利用されている一方で、電波の混信や不要電波による周辺機器の誤動作などが問題となっている。この対策法として電波吸収体による不要電波の抑制があり、この電波吸収体の開発を支援するために、吸収体の材料定数を測定するシステムを開発した。本システムにおいて、誘電体レンズを用いることによって小型試料の材料定数が測定でき、その測定結果が妥当であることを確認した。また、得られた材料定数より、電波吸収体を設計・試作した結果、電波吸収性能の理論値と実測値が一致しており、本システムの実用性を確認した。

キーワード : 電波吸収体, 材料定数, 誘電体レンズ

Development of a Measurement System of Material Parameters for Electromagnetic Absorbers

Hirokazu SUGIURA, Yoshiyuki YOSHIMURA, Yasushi TACHIBANA and Hitoshi NISHIDA

Data communication technology that uses radio waves has been utilized in various devices. Meanwhile, electromagnetic interference and malfunction of equipment caused by undesired electromagnetic waves have become a serious problem. Electromagnetic wave absorbers are regarded as one of the solutions to the problem. In order to support the design of the absorbers, we developed a system to measure the parameters of the materials for the absorbers. The system, with a dielectric lens incorporated, was able to measure the material parameters of downsized samples, and the validity of the measurement results was verified. Then, we designed and made an electromagnetic absorber based on the measurement results. The theoretical electromagnetic absorption performance conformed fairly well to the measured result, which verified the practicality of the system we developed.

Keywords : electromagnetic absorber, material parameters, dielectric lens

## 1. 緒 言

高度情報化社会における電子技術の発展とともに、電波を用いたデータ通信装置の開発が盛んに行われ、その利用が拡大している。例えば、非接触 IC カード、携帯電話、無線 LAN、ETC システムなどがある。反面、多種多様な電波による混信や不要電波による周辺機器の誤動作、情報漏洩などの問題が発生しており、その対策が必要とされている。この対策の一つとして電波吸収体による不要電波、反射波の抑制がある。電波吸収体とは、入射した電波を材料内部で熱に変換することで、電波の反射を抑え、また透過も抑える材料であり、セラミックス、ゴム、樹脂などの材料を用いて製作されている。このように、電波の有効利用の拡大とともに電波吸収体のニーズは高まっており、メーカーでは、低コスト化、薄型化、広帯域化などを目指して電

波吸収体の開発に取り組んでいる。

電波吸収体の開発では、母材の材質、添加剤の材質、粒径、量、材料厚等のパラメータの組み合わせを変更しながら目標の性能に近づける。実際に電波吸収体の性能を決定するのは、吸収体を持つ材料定数(誘電率 $\epsilon$ 、透磁率 $\mu$ )に因るので上記のパラメータを変更することにより、この値も変化する。電波吸収体が吸収性能を発現するにはこの値が特定の範囲(無反射曲線)に入る必要があり、すなわち、電波吸収体の開発におけるパラメータの組合せの変更は、材料定数を無反射曲線に合わせることである。しかし、複数あるパラメータを無造作に変更したところでこの曲線に近づくことは稀で、曲線から離れた値では全く吸収性能を示さなくなる。

従来からの電波吸収体の開発は、材料定数を考慮しないまま試作と吸収性能の測定を繰り返していたため、試行錯誤による開発となってい

\*電子情報部 \*\*ニッコー(株)

た。そこで、材料定数が測定できれば、吸収体の性能を計算によって予測することが可能となり、試作の回数が減少し、開発時間の短縮に結びつく。しかし、材料定数を測定するために用いられている既存の手法(同軸管法、導波管法、自由空間法<sup>1)</sup>等)は試料をドーナツ形状や矩形に切り出すために高い寸法精度を要したり、寸法の大きな試料が必要とされるために大掛かりな測定装置が必要になる等の問題があり広く普及していない。

そこで本研究では、電波吸収体を効率よく設計するために材料定数を簡便に測定できるシステムの開発を目的とする。また、本システムから得られた材料定数を用いて電波吸収体の設計に適用し、システムの実用性を検証する。

## 2. 材料定数測定システムの構築

### 2. 1 材料定数の測定手法

前章で示した材料定数を測定する同軸管法や導波管法では試料の切り出し寸法精度が材料定数の測定精度に大きく影響し、セラミックスやゴムなどは高精度な加工が難しいため、精度の高い測定は困難である。一方、自由空間法は電波無響室など特殊な部屋において、試料寸法が波長の約 10 倍程度必要<sup>2)</sup>であるなど測定が大がかりとなってしまうが、他の手法のような切り出し寸法精度に厳密性が必要とされないため、電波吸収体の試作段階で測定するには有利となる。そこで、本研究では、自由空間法を応用することとし、誘電体レンズを設計・試作し設置することで、電波無響室など特殊な部屋での測定を不要とするとともに、試料の小型化を実現した。また、アルゴリズムの改良により材料定数の算出の効率化を図った。

### 2. 2 材料定数の算出アルゴリズム

図 1 のように、材料に照射された電波は一般に反射、吸収、透過する。反射量が多い材料は電波遮へい材となり、吸収量が多い材料は吸収体となり得る。また、透過量が多い材料は、電波の影響を受けにくい材料として用いられる。これらの量は、材料定数を用いることによって、理論的に算出できる。言い替えれば、反射量、

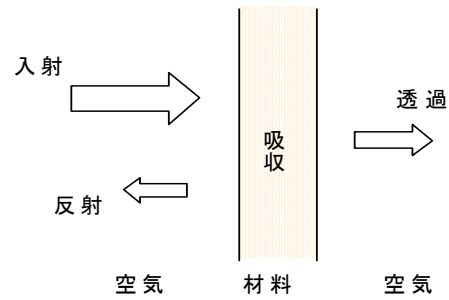


図1 電波の反射, 吸収, 透過

吸収量、透過量のいずれかが分かれば、逆演算によって材料定数を求めることが可能である。しかし、この反射量、吸収量、透過量が精度良く測定できなければ、自ずと得られる材料定数も精度が悪くなってしまう。

従来の材料定数を求めるアルゴリズムはこれらのいずれかの量を用いていた。本研究ではこれらの測定値を総合的に取り扱うことによって、上記測定量のうち一つの測定値が微小であるため算出が困難な場合でも他の測定値で補填し、材料定数を求めることを可能とした。具体的には、式(1)で示される反射性能 $R$ 、式(2)で示される吸収性能 $A$ 、式(3)で示される透過性能 $T$ について<sup>3)</sup>、それぞれを測定した 2 乗和と理論式から求まる 2 乗和との残差が最小となるように材料定数(誘電率 $\epsilon$ 、透磁率 $\mu$ )を決定する。

$$R = \frac{\Gamma(1 - e^{-j2k_1d_1})}{1 - \Gamma^2 e^{-j2k_1d_1}} \quad (1)$$

$$A = \frac{\Gamma - e^{-j2k_1d_1}}{1 - \Gamma e^{-j2k_1d_1}} \quad (2)$$

$$T = \frac{e^{-jk_1d_1}(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 e^{-j2k_1d_1}} \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{\eta_1 - \eta_0}{\eta_1 + \eta_0}, \quad k_1 = \omega \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}, \quad \eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}$$

ここで、 $\epsilon_1$ は材料の誘電率、 $\mu_1$ は材料の透磁率、 $d_1$ は材料厚、 $\omega$ は角周波数、 $\eta_0$ は空気の特性インピーダンスを示す。なお、これらの理論式は超越関数を含んでおり材料定数は一意に求まらない。そこで、ニュートン法による逆演算を行い<sup>1)</sup>、1 次の項を算出することによって、材料定数を求めている。

## 2. 3 システム構成

本研究では図2に示す測定装置を試作することによって、自由空間法を応用した測定システムを開発した。具体的には、フレーム材に樹脂を採用することによってフレームによる電波の反射を防ぎ、測定精度への影響を小さくした。また、大きい試料寸法が必要となる課題については、次節の誘電体レンズを用いることで測定試料の小型化を実現した。さらに、ネットワークアナライザのタイムゲート機能を利用し、試料近傍のみを測定する設定を行い、実験室の床面、天井、壁面からの反射波の影響を除外することで、電波無響室での測定を不要とした。



図2 試作した測定装置

## 2. 4 誘電体レンズによる試料小型化の検討

2.2節の吸収量や反射量、透過量を測定するために、図2ではアンテナ1およびアンテナ2にダブルリッジガイドアンテナ(ETS社製3115)を用いた。本アンテナは高周波帯において広帯域(1.5~10GHz)の電波測定が可能である。また、アンテナ1は試験電波の放射にも用いる。一般にアンテナから放射された電波は放射状に拡散するため、従来の自由空間法では試料に十分な大きさがないと適切に電波が照射されないことや、電波の回折現象の影響が顕著となることから、測定誤差の要因となっていた。そこで、樹脂製のレ

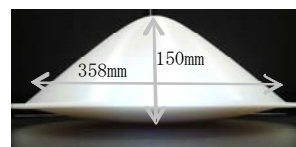


図3 試作した誘電体レンズ

表1 電力半値幅

周波数	1.5GHz	5.5GHz	10GHz
レンズ無し	96°	82°	66°
レンズ有り	41°	16°	23°
レンズ有/無 試料寸法比	0.34	0.16	0.31

ンズを用いて電波を収束させることを検討した。レンズの設計指針では、アンテナ1から放射した試験電波がアンテナ2に向けて進む各経路で電気長が等しくなる(位相が揃う)ようにレンズ径および曲率を設計した。その設計値から、図3に示すように上下で曲率が異なる非球面レンズを試作した。本レンズの有無による送信アンテナの指向性を測定したところ、表1に示すように電力半値幅(放射源を中心に電波強度がピークから半分になるまでの角度)が小さくなっていることが分かる。すなわち、アンテナ1より放射する電波の拡散範囲が絞られていることを意味しており、試料寸法の小型化が達成できた。

## 2. 5 測定値の妥当性の検証

本システムを用いて、テフロン板(400mm×400mm×20mm厚)の材料定数 $\epsilon_r$ を求めたところ、 $\epsilon_r=2.1$ を得ることができた。文献4)によると、これと同値が記載されており、本測定手法が有用であり、測定結果が妥当であると考えられる。

## 3. 材料定数を用いた電波吸収体の設計

### 3. 1 設計法

図4において太線は誘電材料の無反射曲線を示しており、この曲線で表される $\epsilon_r$ (実部 $\epsilon_r'$ 、虚部 $\epsilon_r''$ )でなければ、電波を吸収する材料になり難しく、これに近づけるように材料を開発しなければならない。一般に、材料に添加する添加物の配合率を大きくしていくと、同図中パターンA~Cのように $\epsilon_r$ は大きくなる方向へ推移する。ここで、パターンAとCでは無反射曲線と交錯しな

いため、電波吸収体にはなり得ない。パターンBは無反射曲線と交錯しており、35%程度の配合率にすれば、高い吸収性能が得られることが分かる。このように、材料定数 $\epsilon_r$ が分かれば、添加物の配合率を推定することが可能となり、試作と測定の繰り返し回数を減少させることができる。

また、図4の無反射曲線上の数値は、試料が吸収性能を示す $d/\lambda$ (材料厚/波長)の値を示している。パターンBの場合、交錯する点は $d/\lambda=0.076$ 近傍であり、ETCシステム(周波数5.8GHz、波長52mm)用の電波吸収体を設計する際は $d=0.076 \times 52=3.9\text{mm}$ として、試作すれば良いことが分かる。

### 3. 2 電波吸収体の設計と試作結果

電波吸収体の設計例として、人工ゴムに添加するアルミニウム粉末の配合率を変化させ、本測定システムで $\epsilon_r$ を測定した結果、40%の場合に無反射曲線と交錯し、 $\epsilon_r'=18.9$ 、 $\epsilon_r''=4.6$ が得られた。この場合、 $d/\lambda=0.058$ であり、無線LAN(周波数2.4GHz、波長125mm)用の電波吸収

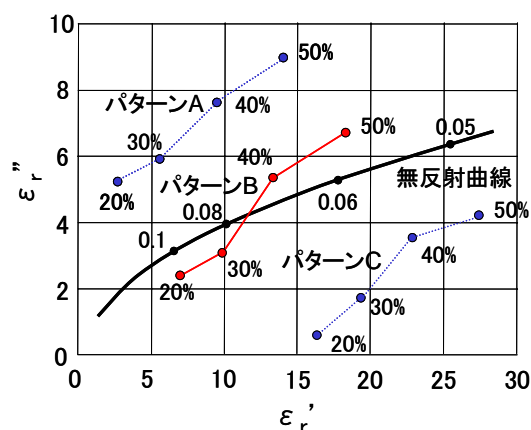


図4 無反射曲線と配合率別材料定数 $\epsilon_r$ の例

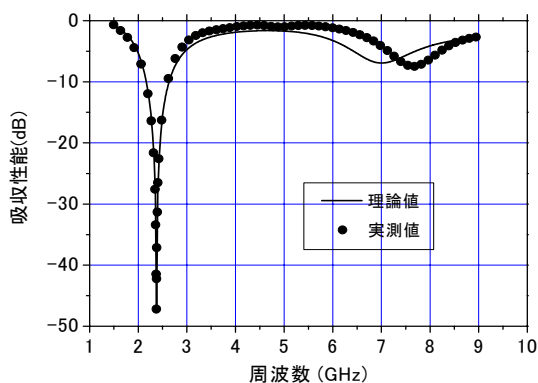


図5 電波吸収性能の理論値および実測値

体を設計すると、 $d=7.3\text{mm}$ となった。この条件で理論的に吸収性能を計算した結果と、試作した試料の吸収性能を実測した結果を図5に示す。これより、理論値と実測値は良く一致しており、本測定システムによって求めた材料定数から電波吸収体を設計する手法の有用性を実証した。

## 4. 結 言

材料定数を用いて効率よく電波吸収体を設計・開発できるようにすることを目的として、簡便に材料定数が測定できるシステムを開発した。開発したシステムの利便性や得られた材料定数の有用性、吸収体設計の妥当性に関して検討し、以下の結果を得た。

- (1) 誘電体レンズを設計・試作し、本システムに用いることで、従来の約1/3程度の試料寸法でも材料定数を測定できるようになり、電波吸収体の設計・試作の負担が低減可能となった。
- (2) 材料定数が既知であるテフロン板の材料定数を本システムで求めたところ、文献値と良く一致しており、その妥当性が確認できた。
- (3) ゴム系電波吸収体の材料定数を測定し、その結果をもとに、無線LAN用電波吸収体を設計・試作したところ、理論計算から求まる電波吸収性能と実測値とが良く一致しており、本測定システムの実用性が確認できた。

なお、今回開発した材料定数測定システムは、県内外企業の電波吸収体開発の一助として、利用を開放している。

## 謝 辞

本研究を遂行するに当たり、試料作製等にご協力を頂いた(株)イナバエンジニア稲葉貞次氏、日本軽金属(株)長嶋道夫氏に感謝します。

## 参考文献

- 1) 橋本修. “高周波領域における材料定数測定法”. 森北出版, 2003, p.11-147.
- 2) 橋本修. “次世代電波吸収体の技術と応用展開”. シーエムシー出版, 2003, p.75.
- 3) 吉村慶之, 長野勇他. “多層媒質による斜入射電波の遮蔽と吸収”. 電子情報通信学会研究報告. 2001, EMCJ2001-5, p. 25-30.
- 4) WILLIAM H.HAYT, JR. “ENGINEERING ELECTRO MAGNETICS”. McGraw-Hill, Inc., 1989, p.451.