

電波吸収体の試作と評価

Development and Evaluation of Electromagnetic Wave Absorbers

田中 健一郎* 松本 元一*
Kenichiro Tanaka Motoya Matsumoto

(2002年7月15日 受理)

This study proposes a new design method for multi-layer electromagnetic wave absorbers based on the theory of transmission line. Genetic algorithm (GA), which is known as a method of discrete optimization, is applied in this study. In the proposed method, a set of materials with several electromagnetic constants is selected to obtain desirable absorption; in contrast, in conventional methods, absorbent materials with continuously variable electromagnetic constants, such as foams, are used. Therefore, this design method increases choice in materials selection and enables materials standardization. Using the proposed method, some prototype absorbers were developed to verify the method. Free space methods for reflection measurement are also discussed to evaluate performance of wave absorbers and measure electromagnetic properties of the materials.

キーワード：電波吸収体，自由空間法，電磁環境，ISMバンド，無線LAN，遺伝アルゴリズム

1. まえがき

近年，2.45GHz，5.8GHz等のISMバンド(Industrial, Scientific and Medical Band)を利用する無線データ通信の大量普及により，当該周波数帯域における電磁環境の悪化が問題になっている。最も普及しているIEEE801.11b無線LAN(2.45GHz)では，同じ周波数帯域を使用するBluetooth等からの妨害や多重経路干渉による伝送速度の低下が報告されている。¹⁾

電磁妨害への対策法としては，金属板による遮蔽が従来から用いられているが，金属板は入射電波をほぼ完全に反射するため，多重経路干渉が問題になる。また，効果的な遮蔽を行うには密閉構造が必要であり，

一般の工場，オフィス，住宅への導入は困難である。

そこで，建材や内装材に電波吸収体(以下，吸収体)を導入し，室内電磁環境の改善を図ることが考えられる。吸収体は電波に対する反射率を極めて小さくした材料であり，電波暗室等の測定設備用，テレビジョン放送のゴースト防止用等種々の製品が開発されている。吸収体を利用することにより，多重経路干渉が抑制され，また密閉構造に拠ることなく電波の漏洩を減少させることも期待できる。

実用化されているマイクロ波帯吸収体の多くは，黒鉛を含む発泡体等，複素比誘電率あるいは複素比透磁率を連続的に変化できる材料を使用し，これらの材料定数を最適値(無反射曲線²⁾近傍)に制御して作製されている。この方法は材料選択の自由度が小さいものの，単層構成の吸収体においても大きな吸収量が得ら

*システム技術部 電子計測グループ

れる。しかし、建材や内装材として電磁環境改善に利用される吸収体は吸収特性だけでなく、使用環境に応じた様々な特性がその材質に要求されるので、一定の性能を維持しつつ、材料の選択範囲を広げられる設計・製作手法が求められる。

そこで、本論文では伝送線路理論に基づく多層型吸収体の設計において、使用可能な材料のリストの中から最適な材料の組合せを探索し、吸収体を構成する手法を提案する。探索には離散最適化の一手法として知られるGA（遺伝アルゴリズム）³⁾を使用した。

本提案手法の有効性を確認するため、設計した吸収体を試作し、自由空間法²⁴⁾により性能評価を行った。さらに、自由空間法で測定した試料の反射率特性から材料定数を推定する方法についても検討を行った。

2. 吸収体の設計法

(1) 吸収量の計算

均一な材料層（媒質層）3層と抵抗膜3層（ R_1, R_2, R_3 ）からなる吸収体の模式図を図1に、その等価回路を図2に示す。吸収体の構成要素である材料層および抵抗膜は、終端インピーダンス \dot{Z}_l を始端から見込んだインピーダンス \dot{Z}_i に変換するインピーダンス変換要素と見なすことができる。面抵抗 R_i の抵抗膜における \dot{Z}_i から \dot{Z}_l への変換は式(1)で表される。

$$\dot{Z}_i = \frac{R_i \dot{Z}_l}{R_i + \dot{Z}_l} \quad (1)$$

次に、材料層における変換は式(2)で表される。

$$\dot{Z}_i = \frac{e^{2\gamma_c d} + \frac{\dot{Z}_l - \dot{Z}_c}{\dot{Z}_l + \dot{Z}_c}}{e^{2\gamma_c d} - \frac{\dot{Z}_l - \dot{Z}_c}{\dot{Z}_l + \dot{Z}_c}} \dot{Z}_c \quad (2)$$

ここで、 d は材料層の厚さ、 \dot{Z}_c は材料層の等価伝送線路の特性インピーダンス、 γ_c は伝搬定数である。自由空間のインピーダンスを Z_0 、材料の複素比透磁率を μ_r 、複素比誘電率を ϵ_r 、材料内部を伝わる電波の複素屈折角を θ_i 、とすると、 \dot{Z}_c はTE波に対して $\dot{Z}_c = \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} Z_0 / \cos \theta_i$ 、TM波に対しては $\dot{Z}_c = \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} Z_0 \cos \theta_i$ と表される。また、角周波数を ω 、真空中の光速を c_0 とすると、伝搬定数 γ_c は $\gamma_c = j\omega \sqrt{\mu_r \epsilon_r} / c_0 \cdot \cos \theta_i$ と表される。なお、 $\cos \theta_i$ は吸収体表面への電波の入射角 θ_i を用いて、 $\cos \theta_i = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_i / \mu_r \epsilon_r}$ と表される。

最表面における入力インピーダンス \dot{Z}_m は、最背面

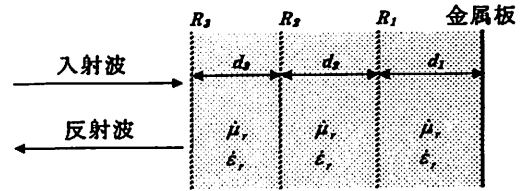


図1 多層型電波吸収体の模式図
Schematic structure of multi-layer wave absorber.

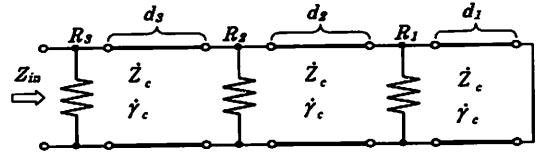


図2 多層型電波吸収体の等価回路
Equivalent circuit of multi-layer wave absorber.

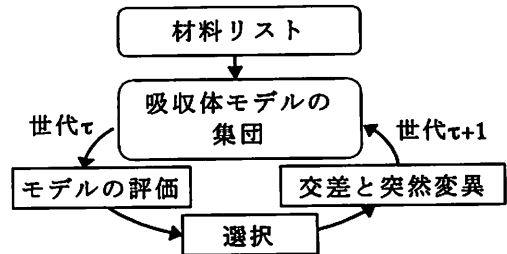


図3 設計手法の枠組み
Framework of proposed design method.

の反射層（短絡終端）から吸収体表面に向かって式(1)および式(2)を順次適用することで求められる。

TE波に対する反射率 $\dot{\Gamma}_{TE}$ およびTM波に対する反射率 $\dot{\Gamma}_{TM}$ は式(3)および式(4)で表される。

$$\dot{\Gamma}_{TE} = \frac{\dot{Z}_m - Z_0 / \cos \theta_i}{\dot{Z}_m + Z_0 / \cos \theta_i} \quad (3)$$

$$\dot{\Gamma}_{TM} = \frac{\dot{Z}_m - Z_0 \cos \theta_i}{\dot{Z}_m + Z_0 \cos \theta_i} \quad (4)$$

なお、吸収量は反射率の絶対値の逆数をとってデシベル表示することで求められる。

(2) 最適解の探索

吸収体を設計するには、周波数範囲、入射角範囲、最小吸収量、厚さ等の設計目標から評価関数を定義し、使用可能な材料の全組合せの中からこの評価関数の値を最小化（または最大化）する組合せを探索する。本研究では、探索手法として実装の容易な遺伝アルゴリズム（GA）を使用した。

GAでは最適化対象を個体の遺伝情報として表現し、生物進化のメカニズムを模倣する形で最適解を探索する。評価関数による個体の評価値は適応度と呼ばれ、この値に基づき、集団内において次世代に遺伝情報を引き継ぐ個体の数を決める。この操作は選択と呼ばれる。遺伝情報に変化を与える操作には、個体間で遺伝情報の一部を交換する交差、確率的に遺伝情報を変化

させる突然変異がある。

初期値としてランダムに個体の遺伝情報を与えられた集団から出発し、評価と選択・交差・突然変異の各操作を反復することで、最適化のプロセスが進行する。図3に本設計手法の枠組みを示す。

探索の結果、得られた解が性能基準を満足していればこれを採用する。性能基準を満足しなかった場合、材料を変更するか設計目標を見直して、再度最適化を試みる。

3. 材料定数の測定法

(1) 測定系

自由空間法は試料に電波を照射し、試料からの反射波（あるいは透過波）をアンテナで受信して反射率（透過率）を測定する方法である。本研究では、吸収体の性能評価法および材料定数の測定法として、反射波を受信する自由空間法を検討した。反射率の基準は、試料（600mm×600mm）と同面積の平坦な金属板である。金属板の反射率は1（完全反射）と見なした。

図4に3GHz以下の測定に使用した測定系を示す。ここでは、伝送特性の振幅と位相を測定できるベクトルネットワークアナライザ（以下、VNA）を使用している。図4において試料を僅かに移動すると、VNAによる伝送量 \hat{S}_{21} の測定値は複素平面上に円軌道を描く。円軌道中心の原点からの変位は試料による反射以外の経路の伝送量を表し、円軌道半径は試料による反射の伝送量を表す。したがって、送受信アンテナ間のカップリングや試料以外に反射物がある場合でも、試料による反射のみを分離して測定できる。また、1個のアンテナを用いて、 \hat{S}_{11} を測定すれば垂直入射波に対する反射率も測定できる。この方法は電界ベクトル回転法²⁾と呼ばれる。ここでは、一定の周波数範囲にわたって円軌道を確定するため、7点以上の試料位置で \hat{S}_{21} あるいは \hat{S}_{11} を測定し、最小自乗法により円軌道を求めた。さらに、一部の周波数で円軌道が正しく求められないことがあるため、ハンペルフィルタで異常データの検出と除去を行った。

VNAの測定可能周波数範囲を超える3GHz以上の測定には、信号発生器とスペクトラムアナライザによる図5の測定系を使用した。

(2) 抵抗膜の面抵抗の測定

背後が自由空間という条件で面抵抗 R_s の抵抗膜に入射角 θ_i でTE波が入射した場合の反射率 Γ_{TE} は $\Gamma_{TE} = -(2R_s \cos\theta_i / Z_0 + 1)^{-1}$ 、TM波が入射した場合の

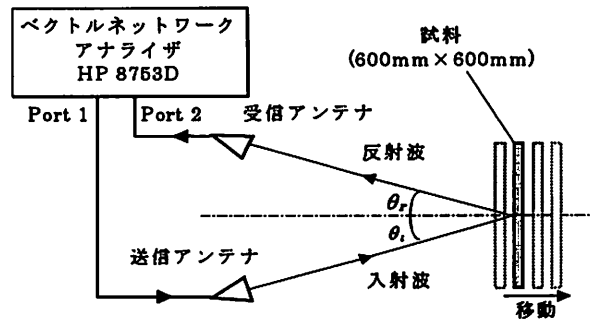


図4 VNAを使用する測定系
Measuring system using VNA.

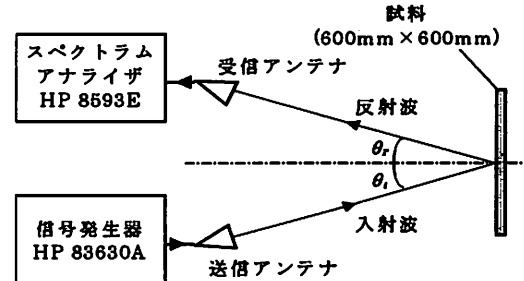


図5 信号発生器とスペクトラムアナライザを使用する測定系
Measuring system using signal generator and spectrum analyzer.

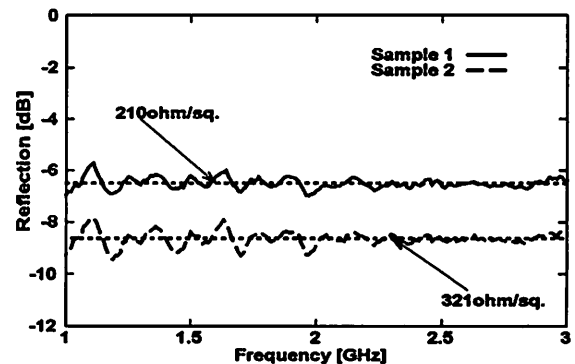


図6 カーボン塗布不織布の反射率特性測定値
Measured reflection characteristics of carbon coated felts.

反射率 Γ_{TM} は $\Gamma_{TM} = -\{2R_s / (Z_0 \cos\theta_i) + 1\}^{-1}$ と表される。これより、 $|\Gamma_{TE}|$ または $|\Gamma_{TM}|$ を測定することで、式(5)または式(6)から面抵抗 R_s を求めることができる。

$$R_s = \frac{|\Gamma_{TE}|^{-1} - 1}{2 \cos\theta_i} Z_0 \quad (5)$$

$$R_s = \frac{|\Gamma_{TM}|^{-1} - 1}{2} Z_0 \cos\theta_i \quad (6)$$

抵抗膜の反射率には周波数依存性がないので、多くの周波数で反射率を測定し、その平均値を用いれば、一周波数での測定値を用いるより高確度で面抵抗を求めることが期待できる。逆に、多くの周波数で反射率を測定した結果、周波数依存性が認められた場合、その材料を単独の抵抗膜として扱うのは不適切といえる。

図6にカーボンを塗布した不織布（試料1, 2）につ

いて自由空間法で測定した反射率特性を示す。試料の
一辺の長さ (600mm) が 4 波長以下となる 2GHz 以
下の周波数において測定値のカーブが大きく振動して
いるのは試料縁端部からの回折波の影響と考えられ、
これを除外すれば反射率は周波数に依存せずほぼ一定
の値をとる。したがって、これらの試料を単独の抵抗
膜として扱うことは妥当と考えられる。測定結果は、
試料 1 が 210Ω□、試料 2 が 321Ω□である。

(3)複素比誘電率の推定²⁾

誘電体の板に電波が入射した場合の反射率は、式(2)
において $Z_i = 0$ (背面に金属板を密着した場合)、
 $Z_i = Z_0 / \cos \theta_i$ (背後が自由空間で TE 波入射の場
合)、 $Z_i = Z_0 \cos \theta_i$ (背後が自由空間で TM 波入射
の場合) として求めた Z_i を Z_m とし、これに式(5)ある
いは式(6)を適用して求めることができる。反射率は板
の厚みと複素比誘電率に依存するので、反射率の測定
値から逆に複素比誘電率を推定することが考えられる。

そこで、複素比誘電率が未知のある試料板 (600mm
×600mm、厚さ 3.5mm) の背面に金属板を密着し、
入射角 15° の TE 波に対する反射率を測定して試料板
の複素比誘電率を推定することを試みた。

ここで、試料の誘電分散特性は図 7 の等価回路モデ

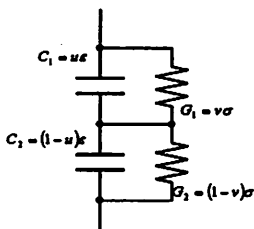


図 7 誘電体材料の
等価回路モデル
Equivalent circuit of
dielectric material.

表 1 複素比誘電率推定値
Estimated dielectric
constants.

周波数 (GHz)	ϵ_r'	ϵ_r''
3	14.3	3.1
4	14.0	2.4
5	13.8	1.9
6	13.7	1.6
7	13.7	1.4
8	13.6	1.2
9	13.6	1.1

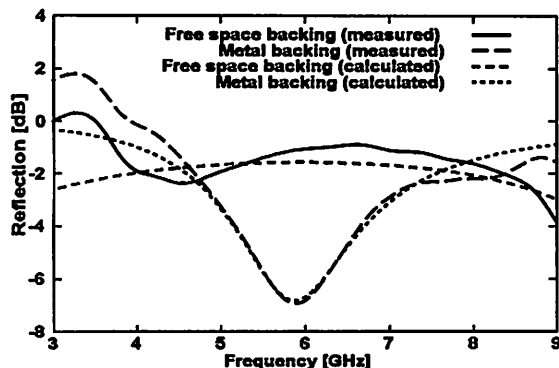


図 8 試料板の反射率特性測定値と推定複素比
誘電率をもつ誘電体板の反射率特性計算値の比較
Comparison between measured reflection
characteristics of a sample plate and calculated
reflection characteristics of a dielectric plate
with estimated complex dielectric constant.

ルで説明できると仮定し、3~9GHz の周波数範囲にお
ける反射率測定値と反射率計算値との残差自乗和が最
小になるように最急降下法を用いて等価回路モデルの
各パラメータ (ϵ , σ , ν) を決定した結果、表 1
に示す推定値が得られた。図 8 にこの試料板について
測定した反射率特性と推定複素比誘電率をもつ誘電体
板の反射率特性 (計算値) を示す。また、試料板背後
が自由空間という条件での反射率特性も、測定値と計
算値がほぼ一致する結果を得た。

4. 試作と評価

(1)試作吸収体の材料

使用した材料は表面に
カーボン塗布し、抵抗
膜を形成した厚さ 2mm
の不織布、スペーサ材(発
泡スチロール板)、反射
層となるアルミニウム
箔である。不織布自体お
よびスペーサ材として使

表 2 カーボン塗布不織布

Carbon coated felts.	
試料	面抵抗[Ω□]
1	210
2	321
3	561
4	712
5	1413
6	1772

用した発泡スチロールの比誘電率はほぼ 1 と見なせる。

抵抗膜 (不織布) はカーボン塗布量を変えて表 2 に
示す 6 種類の試料を作製した。面抵抗は自由空間法に
よる測定値である。スペーサ材は厚さ 5mm, 9.5mm,
10mm, 30mm の 4 種類であり、これ以外の厚さが必
要な場合は組合せて使用する。

(2)試作吸収体の構成

(A)広角吸収体

上記材料の組合せで、周波数範囲 2.4~2.5GHz、入
射角範囲 0° ~55°、TE および TM 両偏波に対して
一定の吸収量が維持されるように最適化を行った結果、
図 9 に示す吸収体の構成が得られた。この吸収体は計
算上、22dB 以上の吸収量を確保している。

(B)広帯域吸収体

周波数範囲 2~6GHz、入射角範囲 0° ~30° とし
て同様の最適化を行った結果、図 10 に示す吸収体の構
成が得られた。この吸収体は計算上、18dB 以上の吸
収量を確保している。

(3)評価結果

試作吸収体の評価には、自由空間法を使用した。測
定系は材料定数の測定に使用したものと同じである。

図 11 に広角吸収体の反射率特性の計算結果(a)およ
び測定結果(b)を示す。0° ~60° の入射角変化に対し、
吸収量が最も維持されるのは 2.6GHz 付近であること

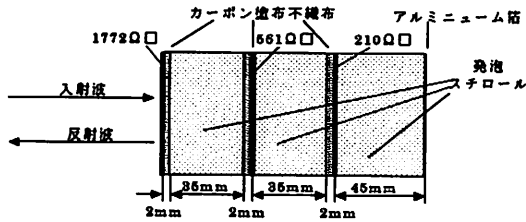


図9 広角電波吸収体の構造
Structure of wide-angle absorber.

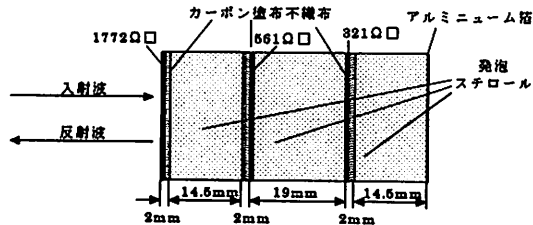
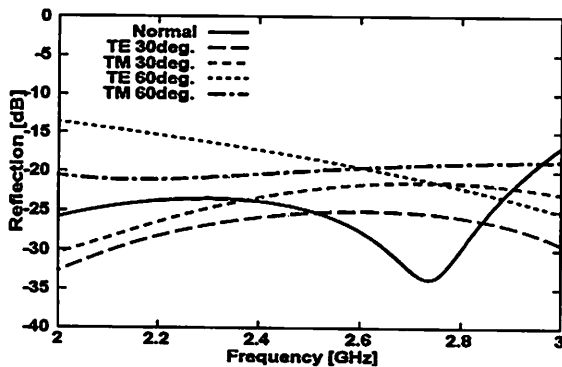
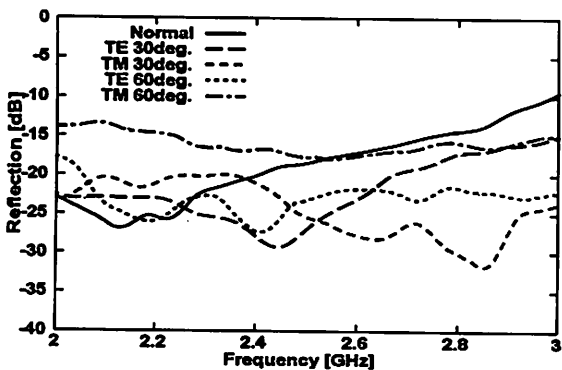


図10 広帯域電波吸収体の構造
Structure of wideband absorber.



(a) 計算結果



(b) 測定結果

図11 広角電波吸収体の反射率特性
Calculated (a) and measured (b) reflection characteristics of the wide-angle wave absorber.

が読み取れる。

図12に広帯域吸収体の反射率特性(TE波, 入射角 15°)を示す。3~4GHz付近における測定値カーブの振動は直接波(送受信アンテナ間のカップリング)の影響である。3GHz以下は電界ベクトル回転法で測定したため、直接波の影響が除去されている。吸収量の測定値は、設計値とは完全には一致しないものの、2~6GHzの殆どの周波数で15dB以上が得られている。

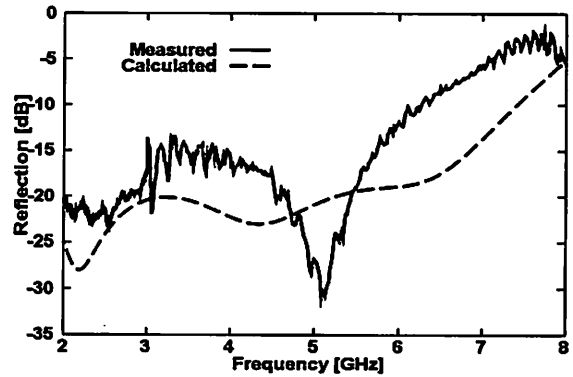


図12 広帯域電波吸収体の反射率特性
Measured and calculated reflection characteristics of the wideband wave absorber.

5. むすび

与えられた材料の中から、多層型吸収体の構成に最適な組合せをGAにより探索する手法を検討し、複数の抵抗膜層からなる広角吸収体と広帯域吸収体の設計に本手法が利用できることを確認した。試作では抵抗膜6種類中4種類だけを選択する結果となったが、この事より、規格化された数種類の材料から様々な特性の吸収体を構成することが期待できる。

吸収体の材料である抵抗膜の面抵抗測定と吸収体の評価に自由空間法を用いた結果、試作吸収体について概ね設計値に近い評価結果を得た。

試作吸収体は材料内で波長短縮のない発泡スチロールをスペーサに使用したため厚みが大きいが、比誘電率の大きい材料や磁性材料を採用すれば薄型化が可能と考えられる。この他、吸収特性測定値と設計値との一致を改善する必要があるが、これには材料測定の高精度化と加工の精密化が必要と考えられる。これらについては今後の課題としたい。

参考文献

- 1) (社)関西電子工業振興センター情報通信システム研究部会, “平成13年度情報通信システムの実環境機能障害対策調査研究補助事業報告書,” pp.67-93, 2002.
- 2) 橋本修, “電波吸収体入門,” 森北出版, 1997.
- 3) 電気学会 GA等組合せ最適化手法応用調査専門委員会編, “遺伝アルゴリズムとニューラルネット,” コロナ社, 1998.
- 4) 青山勝, 渡辺哲史, 和田修己, 古賀隆治, “自由空間法による斜入射電波吸収特性評価法,” 岡山県工業技術センター報告, No.26, pp.39-44, 1999.