

# 電波吸収技術の基礎

橋本 修

青山学院大学 理工学部

Fundamentals of EM-Absorbing Technology

Osamu Hashimoto

College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University

**Abstract :** The demand of radio wave absorbers is increasing considerably with aggravation of electromagnetic wave environment to the extent that it is also called an electromagnetic wave flood in recent years. For this reason, many studies of the absorbers having additional high performances for ITS, wireless LAN and EMC in the case and others have been carried out, and various absorbers are put in practical use. In such a background, the newest technical trends of the radio wave absorbers are discussed. Furthermore, absorption theory and design process of wave absorber is also explained.

## 1 まえがき

近年、携帯電話の普及が示すように、電波環境は悪化の一途をたどり「電波洪水」とも呼ぶべき電波環境を改善するための各種電波吸収体の必要性はますます高まってきている。そこで本基礎講座では、電波吸収体技術について、実用面を中心にした最新の動向を概説し、その吸収原理や設計法について説明する [1] ~ [5]。

## 2 最近の動向

平面波用の電波吸収体は、各種周波数帯（メガヘルツ帯からミリ波帯）における電波暗室用や、レーダ偽像防止対策用、テレビ偽像防止対策用、ETC (Electronic Toll Collection system) 用、無線 LAN 用などに幅広く用いられている。そしてこの場合、種々の吸収特性のみならず、付加特性が必要とされる。

### 2.1 吸収特性の追求

1. 広帯域特性：ミリ波帯をもカバーし、電波暗室等に利用されるピラミッド形状変型吸収体 [6]。
2. 斜入射特性：ITS (Intelligent Transport System) などに利用されるボードタイプ吸収体 [7]。
3. 両偏波特性：ETC (Electronic Toll Collection system) 電波環境対策に利用される 2 層ボードタイプ吸収体 [8] や、無線 LAN を利用するオフィス内において不要散乱波除去を目的に設置するパーティションタイプ吸収体 [9]。

4. ミリ波・サブミリ波用：自動車レーダ、サブミリ波散乱計測、大気圏リモートセンシング等に利用される抵抗皮膜吸収体 [10]。
5. 吸音・電波吸収特性：DSRC に用いられる、発泡ウレタンと電波吸収材の組み合わせによる吸音とともに電波を吸収する吸収体 [11]。

### 2.2 付加価値の追求

1. 耐熱性：高 ERP (Effective Radiation Power) レーダなど、ハイパワーの実験環境等に利用されるハニカム構成の吸収体 [12]。
2. 透明性：無線 LAN における室内窓や ETC レーン間等に利用される、透明体（例えば、ガラス）を用いた抵抗皮膜構成の吸収体 [13]。
3. 施工性：電子機器筐体内や凹凸形状等に利用される、チタンなどを用いた塗料による吸収体 [14]。
4. 耐環境性：トンネル内や架橋等に利用が期待される、エポキシ変成ウレタンゴムなどを用いたゴムシートによる吸収体 [15] や舗装道路に用いるコンクリート系吸収体 [16]。
5. 低コスト：室内の壁や天井などに利用する導電紙や [17]、一般に使用される内装用建材を用いた吸収体 [18]。
6. 周波数選択性：室内無線 LAN 等に利用される FSS (Frequency Selective Surface) を用いた吸収体 [19]。

7. 薄型化：電波暗室などに利用される，磁性材料，誘電材料，抵抗皮膜，FSS などの組み合わせによる吸収体 [20] .

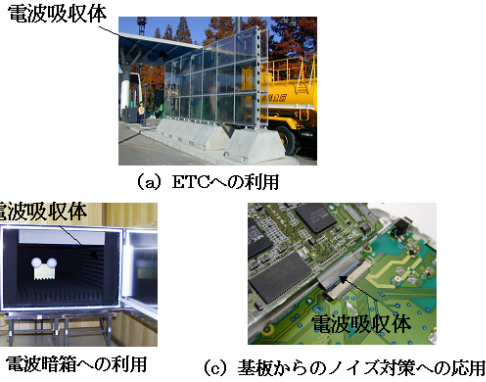


図 1: 電波吸収体の実用例

### 3 電波吸収体の概要

#### 3.1 吸収特性

図 2 に示すように電波吸収特性は，大きく垂直入射特性，斜入射特性，および偏波特性に分類される．これらのどの特性に注目して設計するかは，その用途における要求性能で決まるが，一例として垂直入射特性に注目すると，図 3 のように狭帯域および広帯域電波吸収体と，ある下限周波数以上のすべての帯域を吸収する超広帯域電波吸収体とに分類される．ここで，吸収する帯域特性の良さを示す値として  $F = \Delta f / f_0$  (Figure of Merit,  $f_0$  は中心周波数) を用いる．一般に，電波吸収体をこの値  $F$  で分類すると，狭帯域電波吸収体で 10~20%，20~30% 以上を広帯域電波吸収体と呼んでいる．

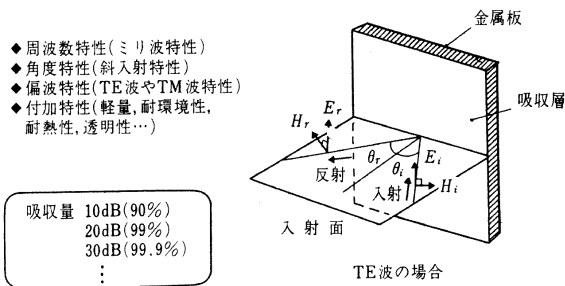


図 2: 入射電波と電波吸収体

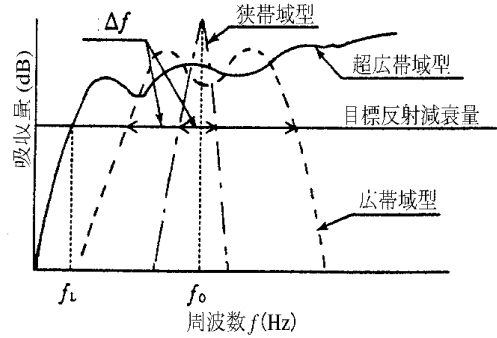


図 3: 電波吸収体の分類例

#### 3.2 実現工程

電波吸収体は，一般に図 4 に示すように大きく 4 つのプロセスを経て実現される．すなわち，まず各種材料の電気的特性 (複素誘電率，複素透磁率，導電率) を測定し，使用材料を選択する．次に，その材料を用いて電波吸収体を実現可能かどうかについて理論的に検討する．そして，もしその材料を用いて理論的に電波吸収体を実現できるとした場合，具体的に厚み等を設計し，その諸元に基づいて製作する．最後に，製作した電波吸収体の吸収特性を測定し，理論値と比較検討するなどして特性を評価する．

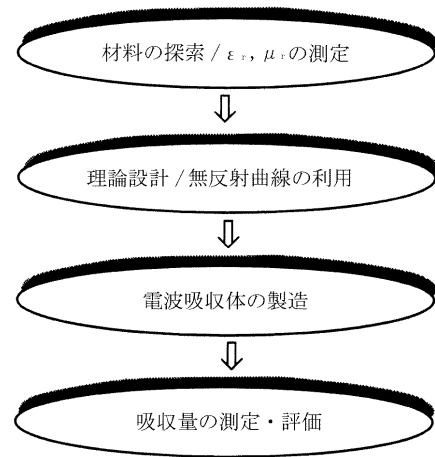


図 4: 電波吸収体の製造プロセス

このように，電波吸収体を実現されるまでには，各種の測定法や計算機を駆使したシミュレーションを行わなければならない，種々の技術課題が含まれている．

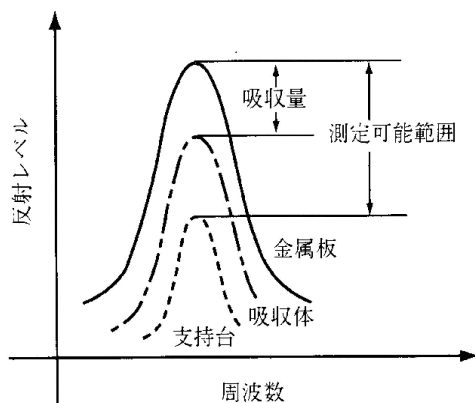


図 5: 吸収量の定義

取り分け，高損失材料の高精度な複素誘電率や複素透磁率の測定には，種々の誤差が含まれる場合が多く，この測定結果に含まれる誤差が，後々まで製作した電波吸収体の特性に影響する．なお，以後電波吸収体の特性は「吸収量」を用いて表すが，この「吸収量」は完全反射体である金属板からの反射レベルに対して，幾何学的に同面積の電波吸収体からの反射レベルがどの程度低下するかによって定義される．図 5 はその様子を示したものである．また測定において，その測定系を用いてどの程度の吸収量を評価できるかの目安として，試料がまったく存在しない場合の反射レベルと金属板とのレベル差を用い，これをその測定系の測定可能範囲と呼んでいる．

## 4 設計法

### 4.1 留意点

図 6 は，電波吸収体の解析モデルを示している．この図に示すように，通常解析は，伝送線理論により行われるが，この理論により解析ができる仮定は，入射波が平面波であり，吸収体は平坦で無限に大きい(波長に比べて  $10\lambda$  程度と大きい)ことである．このため，たとえば，電波源が近くにあり，入射波が平面波でない場合や吸収体の表面が曲率を有する場合，さらに波長に比べて，吸収体がそれほど大きくない場合には，上記の仮定が成り立たなくなる．そのため，伝送線理論を用いた解析が困難となり，モーメント法や FDTD 法等の数値計算法を用いた検討が必要となる．

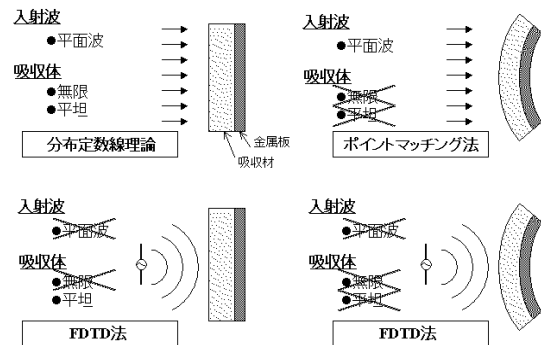
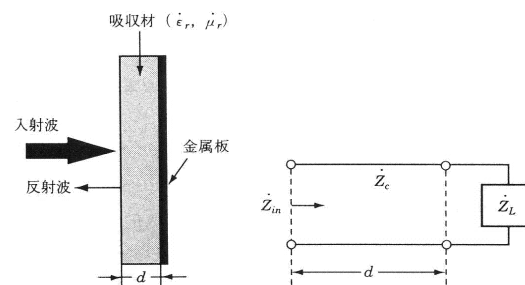


図 6: 各種の解析モデル



(a) 1 層型電波吸収体

(b) 電気的等価回路

図 7: 1 層型電波吸収体の構成と等価回路

### 4.2 1 層型の場合

自由空間を伝搬する平面波が図 7(a) に示す 1 層型の電波吸収体に垂直入射する場合を考える．この電波吸収体を上記の仮定のもとに伝送線路に置き換えると図 7(b) のようになり，受端から距離  $d$  の位置にある点から受端側を見込んだインピーダンス  $\dot{Z}_{in}$  は

$$\dot{Z}_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}) \quad (1)$$

となる．ここで  $Z_0$  は自由空間の波動インピーダンスである．

そして一例として，電波吸収体を誘電損失材料を用いて製作するとすれば， $\mu_r \approx 1$  であるから式 (1) はさらに書き換えられて，

$$\dot{Z}_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r}) \quad (2)$$

となる．また，吸収体表面において無反射(すなわち，反射係数  $\dot{\Gamma} = 0$ ) になる条件は， $\dot{Z}_{in} = Z_0$  であ

るから式 (2) にこの条件を適用して、

$$1 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r}) \quad (3)$$

となり、これを「無反射条件式」と呼ぶ。

さらに、このような垂直入射の場合と同様な考えでTE波、TM波の斜入射に対する無反射条件式もそれぞれTE波とTM波に対する波動インピーダンスと伝搬定数を用いて、次のように求めることができる。

● TE波の場合

$$1 = \frac{\cos \theta}{\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}) \quad (4)$$

● TM波の場合

$$1 = \frac{\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}}{\epsilon_r \cos \theta} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}) \quad (5)$$

以上の式 (3) ~ 式 (5) において、波長  $\lambda$  で規格化した吸収体の厚み  $d/\lambda$  をパラメータとして複素比誘電率の実部  $\epsilon_r'$  と虚部  $\epsilon_r''$  の解を求め、この値を複素平面 ( $\epsilon_r' - \epsilon_r''$  平面) 上に描く。この曲線は通常、「無反射曲線」と呼ばれ、この曲線を用いて簡単に垂直入射や斜入射用の電波吸収体が設計できる。図8に、以上説明した無反射曲線の一例を示す。なお、ここでは誘電損失材料に着目して話を進めたが、磁性材料 ( $\mu_r \neq 1$ ) の場合についても式 (1) を用いて得られる無反射条件式を解くことにより、無反射曲線を導出できる。

このようにして、理論的に求めた無反射曲線を用いて、実際に電波吸収体の設計例を示してみる。すなわち、図8に示すように着目している誘電材料の複素比誘電率がA、B、C点のように変化する場合、B点のように無反射曲線とほぼ交差する点において電波吸収体の実現できる。すなわち、具体的に設計の手順をまとめてみると次のようになる。

1. 損失材料の含有量を変化 (複素比誘電率を変化) させ、材料を製作する。
2. 設計周波数において、材料の複素比誘電率を測定し、その測定値を無反射曲線上にプロットする。
3. 最も無反射曲線に近い  $d/\lambda$  の値を選択する (B点)。
4. 設計周波数における波長  $\lambda$  を求める。

5. 先に選択した  $d/\lambda$  と波長  $\lambda$  から、電波吸収体の厚み  $d$  を決定する。

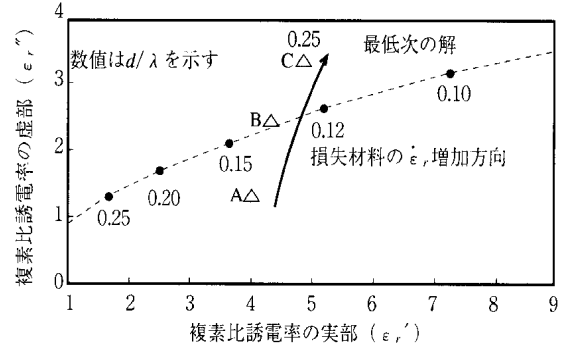


図 8: 無反射曲線と設計法

### 4.3 2層型の場合

図9に示したように、表面層(2層目)と吸収層(1層目)を有する吸収体を2層型電波吸収体と呼ぶ。このような吸収体の理論設計についても、伝送線理論を用いて行うことができ、まず最初に1層目(吸収層)から金属板の方向を見込んだ入力インピーダンスを計算し、これを負荷インピーダンスとして2層目(表面層)前面から見込んだ入力インピーダンスを計算する。

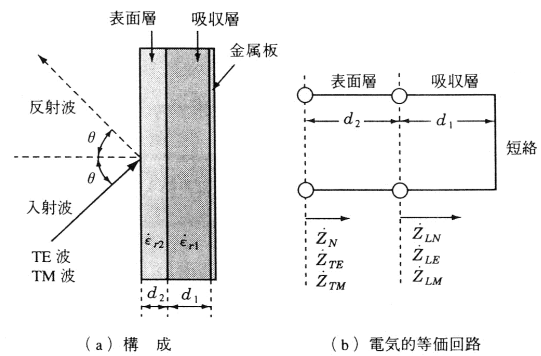


図 9: 2層型電波吸収体の構成と等価回路

そして、このようにして計算した表面層前面から見込んだ入力インピーダンスを用いて、反射係数を計算する。表1にこのようにして計算した垂直入射および斜入射の場合の反射係数を示す。この表から知られているように、垂直入射や斜入射に対して表面からみたインピーダンス  $Z_N$ 、 $Z_{TE}$  および  $Z_{TM}$  は種々の変数 (厚み、複素誘電率、周波数、偏波など) によって変化する。そのため設計時には、

表 1: 各入射に対する反射係数

入射分類	入力インピーダンス	反射係数
垂直入射	$\dot{Z}_N = \frac{\dot{Z}_0 \cdot \sqrt{\epsilon_{r2}} \cdot X + \sqrt{\epsilon_{r1}} \cdot Y}{\sqrt{\epsilon_{r2}} \cdot \sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}} \cdot XY}$ <p>ここで, <math>X = \tanh\left(j2\pi\sqrt{\epsilon_{r1}} \frac{d_1}{\lambda}\right)</math>  <math>Y = \tanh\left(j2\pi\sqrt{\epsilon_{r2}} \frac{d_2}{\lambda}\right)</math></p>	$\dot{\Gamma}_N = \frac{\dot{Z}_N - Z_0}{\dot{Z}_N + Z_0}$
TE 波	$\dot{Z}_{TE} = \frac{\dot{Z}_0}{\sqrt{\epsilon_{r2} - \sin^2 \theta}} \cdot \frac{X/\sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2 \theta} + Y/\sqrt{\epsilon_{r2} - \sin^2 \theta}}{1/\sqrt{\epsilon_{r2} - \sin^2 \theta} + XY/\sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2 \theta}}$ <p>ここで, <math>X = \tanh\left(j2\pi\sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2 \theta} \frac{d_1}{\lambda}\right)</math>  <math>Y = \tanh\left(j2\pi\sqrt{\epsilon_{r2} - \sin^2 \theta} \frac{d_2}{\lambda}\right)</math></p>	$\dot{\Gamma}_{TE} = \frac{\dot{Z}_{TE} - Z_0/\cos \theta}{\dot{Z}_{TE} + Z_0/\cos \theta}$
TM 波	$\dot{Z}_{TM} = \frac{\dot{Z}_0 \sqrt{\epsilon_{r2} - \sin^2 \theta}}{\epsilon_{r2}} \cdot \frac{X\sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2 \theta}/\epsilon_{r1} + Y\sqrt{\epsilon_{r2} - \sin^2 \theta}/\epsilon_{r2}}{\sqrt{\epsilon_{r2} - \sin^2 \theta}/\epsilon_{r2} + XY\sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2 \theta}/\epsilon_{r1}}$ <p>ここで, <math>X = \tanh\left(j2\pi\sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2 \theta} \frac{d_1}{\lambda}\right)</math>  <math>Y = \tanh\left(j2\pi\sqrt{\epsilon_{r2} - \sin^2 \theta} \frac{d_2}{\lambda}\right)</math></p>	$\dot{\Gamma}_{TM} = \frac{\dot{Z}_{TM} - Z_0 \cos \theta}{\dot{Z}_{TM} + Z_0 \cos \theta}$

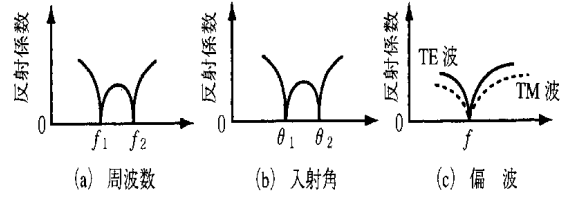


図 10: 吸収特性の概略

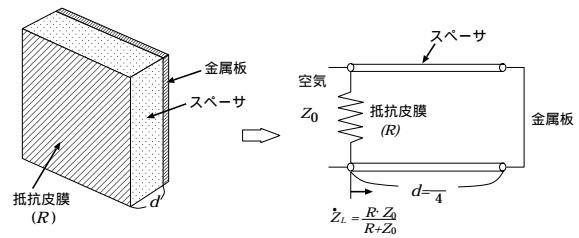


図 11:  $\lambda/4$  型吸収体の構成と等価回路

どの変数に着目するかにより各種特性を有する電波吸収体を設計できる。図 10 はその吸収特性の概要を示したもので、大きく (a) 周波数, (b) 入射角度, (c) 偏波に着目した場合に大別している。すなわち、周波数に着目した場合には広帯域特性, 入射角度に着目した場合には広角度特性, および偏波に着目した場合には両偏波特性 (円偏波特性) に優れた電波吸収体を実現できることになる。

一例として,  $\theta = 0$  (垂直入射) において, 2 つの周波数  $f_1$  と  $f_2$  で  $\dot{\Gamma}_N = 0$  (反射係数が 0) となるようにした場合, 満たさなければならない条件は,

$$\dot{Z}_N(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, d_1, d_2, f_1) = Z_0 \quad (6)$$

$$\dot{Z}_N(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, d_1, d_2, f_2) = Z_0 \quad (7)$$

であり, この条件を用いて垂直入射において広帯域特性を有する電波吸収体の最適設計が可能となる。すなわち, 式 (6) および式 (7) を用いて電波吸収体を設計する場合,  $f_1$  と  $f_2$  は既知であるから未知数は各層の複素比誘電率の実部と虚部および厚みの 6 つとなる。

一方, 式 (6) と式 (7) は複素連立一次方程式であるから, 実際には 4 つの方程式が得られる。そこでたとえば, 厚み  $d_1$  と  $d_2$  を与えてやれば, 未知数の数と方程式の数はともに 4 つとなり, 厚みに対する表面層と吸収層の複素比誘電率 ( $\epsilon_{r1}$  および  $\epsilon_{r2}$ ) が決定できることになる。

#### 4.4 $\lambda/4$ 型の場合

図 11 のように, 金属板から  $\lambda/4$  離れた位置に平面波の波動インピーダンスである  $376.7\Omega$  の抵抗皮膜 (たとえば ITO 膜, 抵抗布など) を配置した吸収体は  $\lambda/4$  型吸収体と呼ばれている。一般に金属板と抵抗皮膜の間 (スペーサ) は空気としているが, 誘電率が  $\epsilon_r$  の誘電材料 (たとえば, PET や AC) を用いると, その内部の波長 ( $\lambda_s$ ) は  $\lambda_s = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}$  ( $\lambda$  は空間の波長) となるので, 厚みを  $\frac{\lambda}{4}$  から  $\frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_r}}$  へと  $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$  だけ薄くすることができる。

このタイプの吸収体の設計は, 伝送線理論を用いて, 抵抗皮膜の前面から見込んだインピーダンス ( $\dot{Z}'_{in}$ ) を計算し, これを平面波の波動インピーダンス ( $Z_0$ ) と等しくおくことにより可能となる。反射係数の計算は, 以下ようになる。すなわち, 金属板の前面に  $d = \lambda/4$  ( $\lambda$  はスペーサ内の波長) の間隔でスペーサ ( $\epsilon_r$ ) を介して抵抗皮膜を置いた構成を伝送線路で表現すると図 11 のようになる。このとき, 抵抗皮膜のわずが金属板側から金属板を見込んだ入力インピーダンス  $\dot{Z}'_L$  は

$$\dot{Z}'_L = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \tanh\left(j\frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r}\right) \quad (8)$$

となる。このことから, 抵抗皮膜も考慮して吸収体前面から見込んだ入力インピーダンス  $\dot{Z}'_L$  は,  $\dot{Z}'_L$

と抵抗皮膜の面抵抗値  $R$  の並列接続となるので、

$$\dot{Z}_L = \frac{\dot{Z}'_L \cdot R}{\dot{Z}'_L + R} \quad (9)$$

となる。

したがって、反射係数  $\dot{\Gamma}$  は、この  $\dot{Z}_L$  を用いて

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{Z}_L - Z_0}{\dot{Z}_L + Z_0} \quad (10)$$

として計算でき、この反射係数が零となるようにニュートン法を用いて  $R$  と  $d$  を決定する。

さて、このような吸収体は、どの程度の厚みになるのだろうか。一例として、スペーサが空気と誘電材料  $\epsilon_r = 10$  の場合について実際にいろいろな周波数に対して厚みを計算してみると、表 2 のようになる。

表 2:  $\lambda/4$  型吸収体の厚み

周波数 (GHz)	厚み (cm)	
	空気 ( $\epsilon_r=1$ )	誘電材料 ( $\epsilon_r = 10$ )
1	7.5	2.37
2.4	3.125	1.0
10	0.75	0.24
60	0.125	0.04
76	0.10	0.03
94	0.08	0.025

このことから、携帯電話などの 1GHz 帯では、空気において 7.5cm にもなり、利用の一例として部屋と部屋の仕切り板に使う場合を考えると少々厚いように思われる。また、誘電材料においては自動車レーダで使用される 76GHz で考えてみると、0.3mm と逆にかなり薄くなり、吸収体を実現する際の加工、製作精度が必要とされることになる。

以上、抵抗皮膜を用いた吸収体について説明したが、スペーサとして空気や無損失の誘電材料だけでなく、誘電性吸収材や磁性吸収材を用いることにより、広帯域化や薄型化さらに低い周波数で用いることも可能となる。

## 5 まとめ

電波吸収体技術の最新の動向について概要を述べるとともに、実際の設計法について解説した。今後、電波吸収体は、その使用周波数の広範囲化や付

加価値の追求、さらには近傍電磁界に対する効果的な利用も含めて、ますますその需要が拡大化してゆくものと考えられる。

## 参考文献

- [1] 橋本 修：電波吸収体入門，森北出版 (1997)。
- [2] 橋本 修：新電波吸収体の最新技術と応用，CMC(1999)。
- [3] 橋本 修：電波吸収体のはなし，日刊工業新聞社 (2001)。
- [4] 橋本 修：次世代電波吸収体の技術と応用展開，CMC(2003)。
- [5] <http://www.ee.aoyama.ac.jp/Labs/hasimoto-www/welcome.html>
- [6] 渡辺他：“電波暗室用マイクロ波帯ミリ波帯対応広帯域電波吸収体の検討”，電子情報通信学会総合大会 SB-1-3(1995)。
- [7] 栗原他：“円偏波対応電波吸収体を用いた狭域路車間通信の環境改善”，電子情報通信学会信学技報，EMCJ2000-117, pp.31-38(2000)。
- [8] M.Hanazawa, et.al.：“A Theoretical Study of Wave Absorber Using Resistive-film for ETC”,Proceeding of 2001 Korea/Japan AP/EMC/EMT Joint Conference pp.246-249(2001)。
- [9] 近藤他：“無線 LAN に対応したパーティションタイプ電波吸収体に関する基礎的検討”，電子情報通信学会論文誌 (C) (2005-12 掲載予定)。
- [10] 花澤他：“抵抗皮膜を用いた 700GHz 帯用電波吸収体の実験的検討”，電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J84-B, No.5, pp.948-950(2001)。
- [11] 横川他：“抵抗皮膜とガラスウールを用いた吸音・電波吸収体に関する基礎的検討”，電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J86-B, No.7, pp.1176-1182(2001)。
- [12] 田中他：“抵抗皮膜列を応用した大電力用電波吸収体の検討”，電子情報通信学会総合大会, B-285(1996)。
- [13] K.Takizawa, et.al.：“Transparent Wave Absorber Using Resistive Thin Film at V-Band Frequency”,IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, Vol.47, No.7, pp.1137-1141(1999)。
- [14] 宗 他：“V 帯および W 帯用塗布型ミリ波電波吸収体に関する検討”，電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J84-B, No.8,pp.1523-1528(2001)。
- [15] 宗 他：“炭素粒子混入エポキシ変成ウレタンゴムシートを用いた 76GHz 帯および 94GHz 帯用電波吸収体の基礎的検討”，電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J83-B, No.6,pp.923-925(2000)。
- [16] 東 他：“電波吸収機能を有する舗装材に関する実験的基礎的検討”，電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J88-B, No.2,pp.485-488(2005)。
- [17] 大塚他：“マイクロ波帯における導電紙を用いた  $\lambda/4$  型電波吸収体に関する基礎的検討”，電子情報通信学会論文誌 Vol.J83-B, No.7, pp.1043-1049(2000)。
- [18] 木村他：“内装用一般建材を用いた三層型電波吸収体の基礎的検討”，電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J88-B, No.6,pp.1130-1138(2005)。
- [19] 伊藤他：“裏打ち FSS を用いた 2 周波数対応選択型電波吸収体の基礎的検討”，電気学会論文誌 T.IEE Japan A 分冊, Vol.122-A, No.11, pp.983-950 (2002)。
- [20] A.Itou, et.al.：“Fundamental Study of  $\lambda/4$  Wave Absorber Using FSS for Two Frequencies”,Microwave and Optical Technology Letters, Vol.33, No.5, pp.321-322 (2002)。