

## 電磁波の吸収・遮蔽技術

畠山 賢一\*

## Electromagnetic Wave Absorbing and Shielding Techniques

Kennichi HATAKEYAMA\*

\*姫路工業大学工学部電子工学科 (〒671-2201 兵庫県姫路市書写2167)

\*Department of Electronics, Faculty of Engineering, Himeji Institute of Technology (2167 Shosha, Himeji-shi, Hyogo 671-2201)

## 1. はじめに

電子通信技術が情報化時代の基盤技術として支障なく発展するためには、電磁波的な環境の整備、すなわち電磁波が原因で機器間に発生する諸々の不具合を抑えることが必須技術とされている。電磁波を吸収するためのデバイスを電波吸収体、電磁波を遮蔽するデバイスを電磁遮蔽材と言ひ、どちらも機器動作のために必要な電磁波以外の成分、いわゆる不要電磁波を吸収、遮蔽するために用いる。電磁波吸収、遮蔽は電磁環境整備における中心的な技術であり、これまで種々の吸収、遮蔽技術が開発されてきた。今後、電磁波利用はますます進み、これに伴って新たな吸収、遮蔽技術が開発されるであろう。これらは電磁環境整備技術にかかわる技術者にとって今後ますます重要性を増すと思われる。ここでは、電波吸収体、電磁遮蔽材について、材料から設計、評価、応用面までを解説する。また、この分野に関連が深い電波暗室についても触れた。

## 2. 損失材料と電磁波の吸収、遮蔽

電波吸収体、電磁遮蔽材はどちらも損失材料を用いるので、まず損失材料について簡単に述べる。損失材料では、電磁波が伝搬するにつれて次第にそのエネルギーが材料中に熱エネルギーとして吸収され、振幅が減衰する。損失材料内での伝搬は  $|A|e^{-\alpha r}e^{-j\beta r}$  の形で表される。 $|A|$ は電界、あるいは磁界の振幅であり、 $\alpha$ は減衰定数、 $r$ は伝搬距離である。損失材では $\alpha$ は0でない値であり、 $r$ の距離を伝搬すると振幅は $e^{-\alpha r}$ だけ小さくなる。振幅が小さくなった分だけそのエネルギーが損失材料中に吸収される。一方、比誘電率、比透磁率が $\epsilon_r (= \epsilon_r' - j\epsilon_r'')$ 、 $\mu_r (= \mu_r' - j\mu_r'')$ である媒質内での伝搬は $\lambda$ を自由空間波長とすると  $|A|e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\epsilon_r\mu_r}r}$

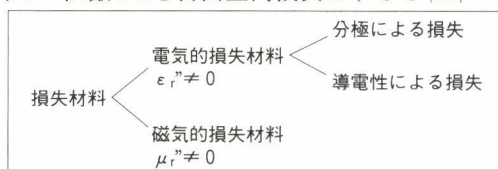


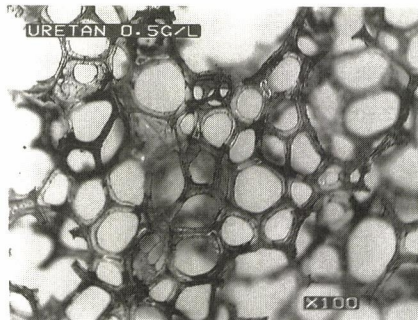
図1. 損失材料の種類

と表されるから、 $\alpha$ が0でないということは $\epsilon_r''$ 、 $\mu_r''$ のどちらか、あるいは両者が0でないということである。図1に示すように、 $\epsilon_r''$ が0でない材料を電気的な損失材料、 $\mu_r''$ が0でない材料を磁氣的な損失材料という。電気的な損失はさらに導電損失と誘電損失の2種類がある。

導電率が0でない材料に電界が印加されると電流が流れる。このとき、電気回路の抵抗に電流を流した場合と同じくジュール熱が発生し、媒質中に電磁波エネルギーが吸収される。これが導電損失である。図2は著書らが用いている導電性材料の拡大写真であり、(a)はカーボンを付着させたセラミック繊維<sup>1)</sup>、(b)はカーボンを充てんしたウレタン発泡材である<sup>2)</sup>。いずれもピラミッド形吸収体の材料である。この例のように、導電性材料はカーボンその他の導電性材料を空間的にまばらに保持し、適度な導電性を得るようにしている。したがって、導電性材料の誘電率とは、このようにまばらな材料を均質な媒質とみたときの仮想



(a) カーボンを付着させたセラミック繊維材料



(b) カーボン混合発泡ウレタン

図2. 導電性材料（黒く見える部分はカーボン）

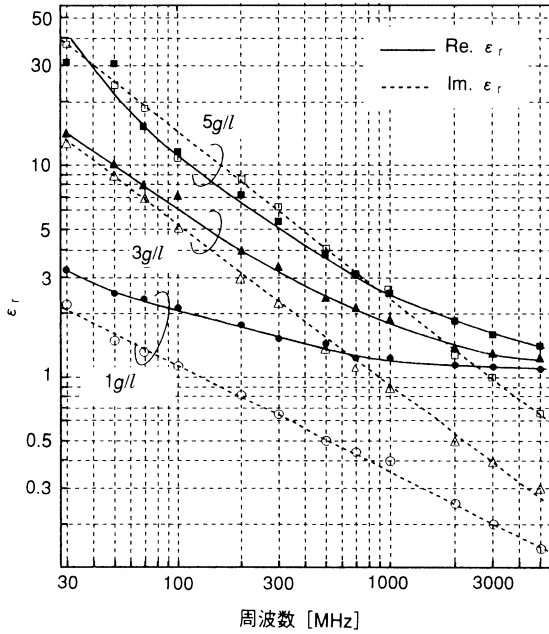


図3. カーボン混合発泡ウレタンの誘電率  
(図中の数字は1lの体積中のカーボン量を表す)

的な誘電率である。導電率を $\sigma$ 、角周波数を $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$ は周波数)とすると、 $\epsilon_r'' = \sigma/\omega$ の関係がある。すなわち、導電性材料では $\epsilon_r''$ は周波数に反比例する傾向がある。図3に示すように、実際に測定してみると $\sigma$ があまり大きくないときは完全に反比例の関係ではないことが多いが、周波数が高くなるにつれて $\epsilon_r''$ がかなり広い周波数にわたって単調に小さくなる傾向を持つ。損失の大きさを広い周波数帯で調整できるので、吸収体や遮蔽の材料として多く用いられている。

誘電体に電界をかけると分極する。分極の正負は電界にしたがって変化するが、高周波になると分極の動きが電界の時間変化に追従できなくなり、損失が現れる。これが誘電損失である。例えば、極性を持つ水は通常は極性がランダムに分布し、全体として分極することはないが、電界がかけられると極性がそろい、分極するようになる。よく知られているように、この分極はマイクロ波帯になると次第に印加電界に追従できなくなって損失が現れ、 $\epsilon_r''$ が大きくなる。分極が生じることが元になって発生する損失は、誘電率の実数部、虚数部には緩和形、または共鳴形の周波数変化が伴う。したがって、誘電率の実数部に変化がない周波数帯では、分極による損失はない<sup>3)</sup>。物質によって損失が大きくなる周波数帯が定まっており、マイクロ波帯で損失が大きくなる材料は多くないこと、損失の大きさが調整できないこと、などのために吸収、遮蔽材にはほとんど用いられない。しかし図4に示すように、金属繊維複合材の誘電率はあたかも分極が元で発生する損失であるかのような共鳴的な変化を示す<sup>4)</sup>。これは、金属短繊維が人工的な分極を生じさせ、繊維長が媒質内波長の1/2あたりになる周波数で共振現象が起こる結果、誘電率にこのような周波数特性が現れると解釈されている。この材料は繊維長で

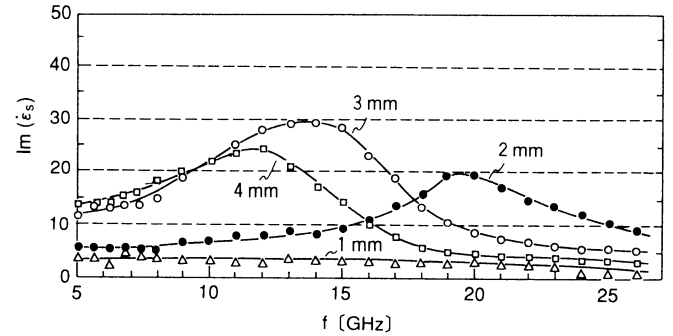
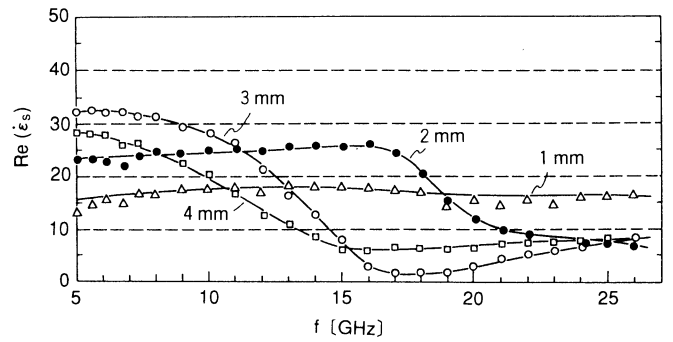


図4. 金属繊維複合材の誘電率  
(フェライト/クロロプレーンゴム/黄銅繊維=68.5/29.5/4.5)  
(図中の数字は金属繊維の長さ)

共鳴が生じる周波数を変えられ、また繊維分散量で損失の大きさを調整できるので、マイクロ波帯の2層形吸収体材料として用いられている。この材料だけは、分極を利用する損失材料の範ちゅうである。

なお、損失が分極によるものか導電性によるものか区別せずに、誘電率の損失分 $\epsilon_r''$ を上記の関係式を用いて導電率 $\sigma$ に置き換えることが時々見られるが、これは計算上のことだけであって、この2つの損失は本来まったく別々のものである。

磁性材としては金属磁性体と酸化物磁性体(フェライト)がある。低周波では透磁率の大きい金属磁性体が用いられるが、高周波では内部に電磁波が浸透して磁氣的損失で減衰することが必要なので、導電率の低いフェライトが主に用いられる。磁性体とは磁氣的な自発分極を有する材料であり、ある程度大きい体積になると、自発分極が同じ向きにそろった磁区と呼ばれる小領域に分かれる。各磁区に分極はランダムな方向を向き、全体としては外部には分極を示さない。これに磁界が加えられると、磁壁(磁区と磁区の境界面)が平行移動して磁界と平行な向きの分極を持つ磁区が占める体積を大きくし、全体として分極するようになる。磁壁の移動は共鳴的であり、高周波になると磁壁移動が磁界の変化に追従できなくなって損失分が現れる。さらに、磁区内の自発分極はこれに垂直な面内に高周波磁界が加えられると高周波磁界の方向に傾き、磁区に高周波磁界に平行な向きの分極が生じる。傾いた自発磁化は才差運動を行うことによって磁気共鳴が生じる。磁壁の移動によって生じる分極と自発分極の傾きによってできる分極の和

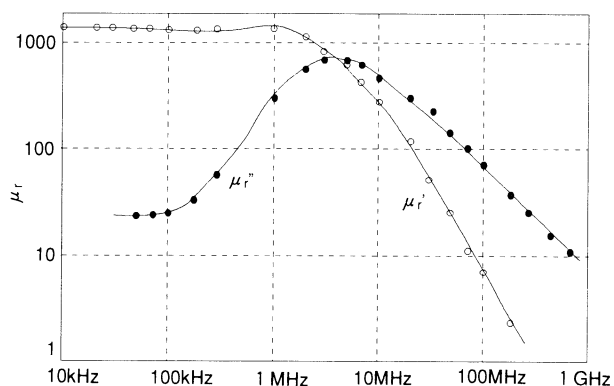


図5. NiZnフェライトの透磁率の測定例

が磁気的な分極であり、いずれも共鳴するあたりで損失が生じ、 $\mu_r''$ が大きくなる。どちらも外部からの直流バイアス磁界がない状態での共鳴なので、特にこれを自然共鳴と言う<sup>9)</sup>。吸収、遮蔽材としては、外部バイアス磁界を用いず、自然共鳴による損失を利用するのがほとんどである。磁壁による分極の自然共鳴はVHF~UHFにあるが、自発分極のそれは異方性磁界（自発分極をある方向に向ける力を表す等価的な磁界）に比例する。

図5にNiZnフェライトの透磁率の例を示す。このフェライトはVHF帯あたりから上の周波数帯で自然共鳴による損失が大きくなり、VHF~UHFで $\mu_r'' \ll \mu_r'$ であることを利用した広帯域吸収体<sup>6)</sup>、1GHz以上では $\tan \delta(\mu_r''/\mu_r')$ が大きいことを利用してゴムやペイントとの混合材の吸収体などが設計でき<sup>7)</sup>、いずれも基本的な吸収体となっている。スピネル系ではおよそ20GHzを越えると $\mu_r''$ がほぼ0になるので、このあたりが磁気的な損失を利用できる限度である。最近では、異方性磁界の大きいヘキサゴナル系フェライトを用い、自然共鳴による損失が1-10GHz帯で大きくなるようにして広帯域吸収体を得る技術が開発されつつあり<sup>8)9)</sup>、注目されている。

電磁波の吸収や遮蔽を目的としたとき、どの損失がどれくらい大きいことが要求されるであろうか。板状の遮蔽材を考えた場合、入射してきた電磁波を透過させないために、できるだけ速やかに材料内で減衰させる必要がある。そのためには前述の減衰定数 $\alpha$ はできるだけ大きいことが望まれ、 $\epsilon_r''$ 、 $\mu_r''$ は大きいほど良い。導電率 $\sigma$ の大きい金属が良い遮蔽材となるのはこのためである。低周波の磁界を遮蔽するときは、誘電率の損失はあまり関係なく、透磁率が大きいことが必要であるので、金属磁性体が多く用いられる（上では $\mu_r''$ に注目して述べたが、低周波数での磁界の遮蔽には $\mu_r'$ だけでなく $\mu_r''$ も重要である）。一方、吸収体では、入射波を反射させないという条件が付くため、周波数、厚みにあわせて誘電率、透磁率を調整することが必要となり、必ずしも損失が大きいほど望ましいということにはならない。損失がどれくらい大きい材料を用いるかは、どのような吸収体、遮蔽材を設計するかによって異なる。

### 3. 電波吸収体

#### 3.1 電波吸収体の種類と特性

電波吸収体の開発が始まったのは1940年代で、アンテナの指向性を測定するための電波暗室やレーダの性能向上のために使用された<sup>10)</sup>。当初はカーボンを付着させた獣毛を吸収材として用いていたが、ほどなく発泡プラスチックにカーボンを充てんし、ピラミッド形とする吸収体が開発された。今日、ほとんどの電波暗室に用いられているピラミッド形電波吸収体の吸収性能は、この時代に開発されたものとそれほど変わってはいない。1950年代から1970年代にかけて、1/4波長厚みの損失材による吸収体、インピーダンス無限大の位置に空間の波動インピーダンスと同じ値の抵抗膜を貼り付ける吸収体（当時はベニヤ板を1/4波長の厚みにして金属面に貼り付け、インピーダンス無限大の開放壁を作った。開発者の名前をとってSalisbury（サリスバリー）形と呼ばれることもある）、フェライト焼結体を用いるVHF用吸収体<sup>11)</sup>など、今日の電波吸収体の基になる吸収体が開発された。その後、今日まで、周波数特性、耐候性、重さ、厚さ、耐熱性などの改良を狙っているいろいろなバリエーションが開発されてきた。

以上述べたように、電波吸収体はすでに種々のタイプが研究され、実用化されている。表1は現在市販されている主な電波吸収体を形状、構造、材料面から分類し、周波数帯や用途を示した。フェライト混合材、カーボン混合材では、共振に似た吸収特性であるが、周波数帯は1-20GHzと示してある。これは、1-20GHzの範囲でこのような特性の吸収体が設計できるという意味で、周波数帯域幅が1-20GHzではない。また、1GHz以下でも設計は可能であるが、厚み、重さの点で1GHz以上が実用的な設計周波数で

表1. 種々の吸収体

形状	構造	材料	周波数帯、特性	特徴	用途	文献
平坦形	単層型	フェライト焼結体	VHF-UHF	薄形 (約6mm) 広帯域	電波暗室 テレビ ゴースト対策	4) 11)
	単層型	フェライト混合材	1-20GHz	薄形 狭帯域 耐候性	レーダ	5) 12)
	単層型	カーボン混合材	1-20GHz	薄形 狭帯域 耐候性	レーダ	13)
二層型	多層型	金属繊維複合材	1-20GHz	薄形 帯域広い	レーダ	8) 14)
	多層型	カーボン混合材	数十MHz~	広帯域 吸収量大	電波暗室	15)
楔形 ピラミッド形		プラスチック発泡材 + カーボン	数十MHz~	広帯域 吸収量大	電波暗室	9) 16) 17)



あろうと思われる。用途は主なものをあげてある。注意することは、ほとんどの吸収体は平面波入射に対して設計されているので、極端に斜め入射である場合、あるいは波源から近いために平面波入射と考えられない場合は吸収特性は相当劣化することである。

ウレタン発泡材を用いたピラミッド形の使用最低周波数は、およそピラミッド高が波長と同等程度になるあたりである。例えば1GHz以上で使う場合は数十cmの高さ、10GHz以上での使用には数cmの高さであり、高周波用ほど小さいピラミッドになる。前章で述べたように、導電性損失材料では損失を表す $\epsilon_r''$ は $\omega$ に反比例するので、ピラミッド高が低い吸収体ほどカーボン充てん量は多くなる傾向がある。

ピラミッド形吸収体では周波数が高くなるほど吸収量が大きい。どのくらい高周波までこの傾向が続くかという、ミリ波帯での測定になるので吸収特性の報告例は少ないが、ウレタン発泡材を用いて調べた例が報告されている<sup>18)</sup>。それによれば150GHz~200GHzあたりになると吸収特性が逆に小さくなる傾向に逆転する。この原因は明確にはなっていないが、発泡材のセル（空孔のこと、図2に示すようにおよそ直径1mm以下の連続した空孔になっており、カーボンはその内壁に付着している）の寸法がこのあたりの周波数では波長と同程度になることによると思われる。

### 3.2 電波吸収特性の評価法

吸収体特性評価法も吸収体開発と同時期にいろいろ工夫された。1950年代にはアーチ形の支持台に送受信アンテナを取り付けて吸収性能を測る方法や<sup>19)</sup>、VHF-UHF帯あたりでの測定のために大型の同軸管や導波管を用いる方法<sup>19)</sup>などがすでに用いられており、ピラミッド形吸収体の性能をおよそ50dBあたりまで測定している。最近ではネットワークアナライザ、スペクトラムアナライザなどの測定器がデジタル化され、校正、データ変換、周波数領域測定から時間領域での変換などもボタン操作で瞬時に行えるようになって非常に便利になった。しかし、発信器受信器以外の装置については現在でも当初開発されたものとほとんど変わっていない。

吸収体の評価法として最も簡単なものは、同軸線路や導波管に試料を挿入して反射を測る方法である。これらは試料製作が効率的であるから開発段階の評価法として用いられるが、小試料であるため、正確に言うと材料評価法である。吸収体評価装置としては、一定の面積で評価でき、材料のばらつきなどの情報が得られること、表面平坦ではないピラミッド形のようなものでも評価できること、等が必要である。著者のグループが使用している測定装置の一部を図6に紹介する。高さ約10m、断面60cm×120cmの大型のストリップラインを用い、底面に吸収体が2個設置できるようにになっている。この装置では300MHz以下の吸収特性が測定可能である。



図6. ストリップ線路を用いた吸収体評価装置  
(東北化工社殿のご好意による)

## 4. 電磁遮蔽

### 4.1 電磁遮蔽材の種類と特性

金属は電磁波を透過させないので、電子機器の筐体には金属が用いられていた。この傾向は現在でも変わらない。1970年代以降、プラスチックに種々の形状の金属粒子を分散させて導電率を大きくし、電磁遮蔽効果のあるプラスチック筐体の実用化を目指した研究が盛んに行われた<sup>20)21)</sup>。しかし、導電率がそれほど大きくはならなかったことや製造コストの点から現在ではそれほど普及していないようである。プラスチック筐体では、溶射、めっきを施すことが多い。

表2に遮蔽材を原理的な面から分類して示す。伝搬損失形とは、この材料中を電磁波が伝搬する際に減衰し、透過を少なくするものである。一般に遮蔽材というこのタイプを指すことが多い。短絡回路形から1/2波長形までは隙間用の遮蔽材である。短絡回路形は、隙間を構成する2枚の金属板を同電位にして電磁波が隙間に存在しないようにしたもの、インピーダンス挿入形は、隙間を伝送線路と考えたときに伝搬路にインピーダンスを挿入して透過を小さくするもの（チョークとしての作用）である。カットオフ形は、隙間が導波管と扱えるときはカットオフの現象を利用して減衰させる方法である。導波管内壁に磁性体シートを挿入して減衰量を大きくする工夫もされている<sup>22)</sup>。この2つは、隙間を完全に塞がなくとも遮蔽効果が大きいという特徴がある。1/2波長形とは短絡面から1/2波長戻った位置のインピーダンスは短絡となることを利用したもので、従来から導波管フランジ、あるいは電子レンジ扉用として用いられている。遮蔽にはこのほかに、静電界遮蔽、静磁界遮蔽があるが、本稿では触れない。各タイプによって、効果的な周波数帯があり、また次章で述べるが、電界、磁界、平面波の各入射に対する遮蔽量が異なる。

### 4.2 遮蔽材の使用に関する留意点

実際の機器に遮蔽材を適用するとき、基本的に知って



表2. 種々の遮蔽材

	形	材料	遮蔽特性	応用
伝搬損失型		金属板	数千Hz～	建物、筐体
		電波吸収材	1 GHz～	隙間
		遮蔽ガラス 透明遮蔽	数十MHz～	窓、ディスプレイ
短絡回路型		金属板バネ 金網 導電クロス 溶接 はんだ付け	数十kHz～100GHz	隙間
インピーダンス挿入型		フェライトロッド	数十kHz～20GHz	隙間
カットオフ型			0～100GHz ( $\lambda > a$ )	建物 筐体、ケース ハニカム 穴、空気孔
	 磁性体シート	フェライトロッド または アモルファス 繊維シート		
1/2波長型			1 GHz～数十GHz	導波管フランジ 電子レンジ扉 マイクロ波乾燥機
静電遮蔽		金属		
静磁界遮蔽		強磁性材 パーマロイ 電磁鋼板	数十dB	地磁気の遮蔽 リニアモータ

おくことが必要であろうと思われることを整理しておく。

まず、遮蔽材は実際には電磁波を放射している個所のすぐ近くで用いることが多いということである。この場合、「すぐ近く」とは、おおよそのところ発生源からの距離が波長以内という意味である。例えば、発生する電磁波の周波数を仮に1 MHzから1 GHzとすると波長は300mから30cmであり、電子機器がかなり大型であってもこの筐体に遮蔽材を使うとほとんどの周波数帯が「すぐ近く」の領域に入る。このような場所では電磁波伝搬の形態は平面波とは非常に異なっており、発生源のすぐ近くでの遮蔽量は、発生源がコイルのように磁界を発生させる場合は磁界に対する遮蔽量、ダイポールアンテナのように電界を発生させる場合は電界に対する遮蔽量となる。この2つと、前章で述べた平面波に対する遮蔽量がある。したがって、同一の遮

蔽材に対して3つの異なった遮蔽量があり、これらは同一の試料でもまったく異なった値を示すことである。図7に導電性膜の遮蔽量の一例を示す。周波数が低い領域では、磁界に対する遮蔽量<平面波に対する遮蔽量<電界に対する遮蔽量、の傾向がある。このことは、例えば、金属板は静電界遮蔽材としては効果が大きい、一方静磁界はまったく遮蔽しないことから直感的に理解できよう。遮蔽材のカタログには上の3つのどれであるかが区別されて遮蔽量が記載されていなければならないし、また使用者は使う場所の特徴をよく調べ、磁界を遮蔽するための遮蔽材ならば磁界に対する遮蔽量を参考にしなければならず、電界、平面波に対しても同様である。

次に注意する点は、電磁波はどこから漏れるかということである。文献<sup>23)</sup>では、機器内部の回路で発生した電磁波

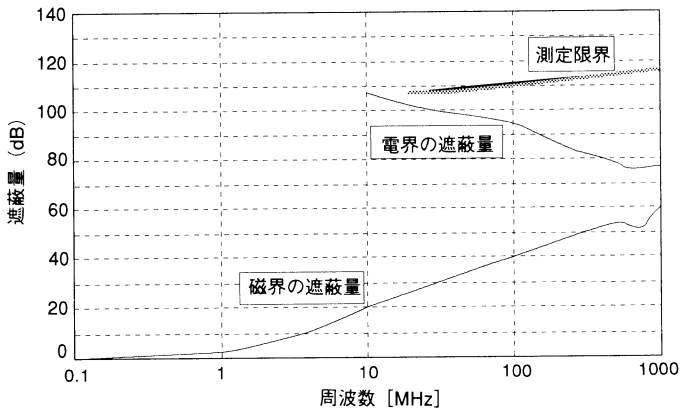


図7. めっきプラスチックの電界，磁界の遮蔽量

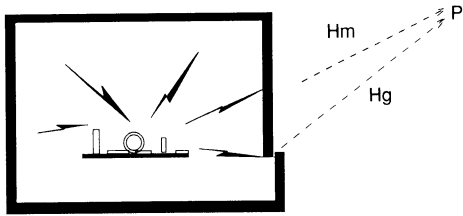


図8. 筐体からの電磁波漏洩モデル

の漏洩成分を、図8に示すように筐体板を透過する成分  $H_m$  と隙間を透過する成分  $H_g$  とに分けて扱い、両者の合成を外部で観測した結果を述べている。それによると、低周波では筐体板厚みが表皮深さより薄くなるので  $H_m \gg H_g$  となり、ある程度周波数が高くなると金属板の遮蔽が大きくなるので  $H_m \ll H_g$  になる。この境目の周波数において、ちょうど  $H_m$  と  $H_g$  の振幅が等しく、位相が  $\pi$  だけずれていると両成分は打ち消しあい、観測点での漏洩波は非常に小さくなる。この現象はあたかも共鳴のようなので、低周波共鳴と言う。したがって、低周波共鳴より周波数が低ければ、漏洩の主な成分は筐体板を透過する成分であるから、遮蔽を大きくするためには筐体板を厚くするか、またはさらに導電性のよい材料に換えることが必要で、隙間をふさぐことは効果がない。逆に低周波共鳴より周波数が高ければ隙間を遮蔽することが必要であって、筐体板の遮蔽を増すことは効果がない。個々の装置で低周波共鳴を測定するのはかなり面倒だと思われるが、文献を参考にすると、機器に用いられる通常材料（ステンレス、鋼板、アルミ板など）で0.3～1 mm程度の厚みでは数kHz～数十kHzであるとされている。以上のことはおおよそ直感的にも理解できると思われるが、プラスチック筐体にめっきや溶射で導電膜を作る場合は、共鳴周波数は数十MHzになることもある。

### 4.3 電磁遮蔽効果の測定法

前章で述べたように、遮蔽量には磁界，電界，平面波に対する3つの遮蔽量があり、それぞれに対して測定法がある。このうち、電子機器に用いる遮蔽材では主に1 GHz以下の周波数を対象とするので磁界，または電界に対する遮蔽量が必要となる。磁界に対する遮蔽量は2つのコイル間に試料を置いて透過を測定する方法，電界に対する遮蔽量

は2つのダイポールアンテナ間に試料を置いて透過を測定する方法が基本的な方法である。いろいろなバリエーションがあり、すでに測定装置が製品化されている。詳しい測定法は文献をあたっていただきたい<sup>21)</sup>。

最近ミリ波帯の使用が盛んになりつつあり、これに伴い電磁環境を整備する目的でオフィス，建物を電磁遮蔽することが必要になると言われている。ミリ波帯の遮蔽材開発は今後重要性が増すと思われる。ミリ波という非常に周波数が高い領域での電子機器の遮蔽は、前章で述べたように、金属筐体の隙間の遮蔽が主になる。また、建造物の壁の遮蔽効果を測定するには、ミリ波では波長が数cm以下であるから発生源からの距離は波長よりも非常に長くなり、平面波入射での遮蔽量と考えてよい。隙間用遮蔽材の測定にしても、平面波入射での板状試料の測定にしてもミリ波で使用できる方法は少なく、測定例もあまり報告されていない。ここでは参考のために筆者らのグループが用いている方法を紹介する。

図9は実際にオフィスの壁材料を測定したときに採用した方法と測定例である<sup>22)</sup>。ミリ波では、単に送信アンテナ

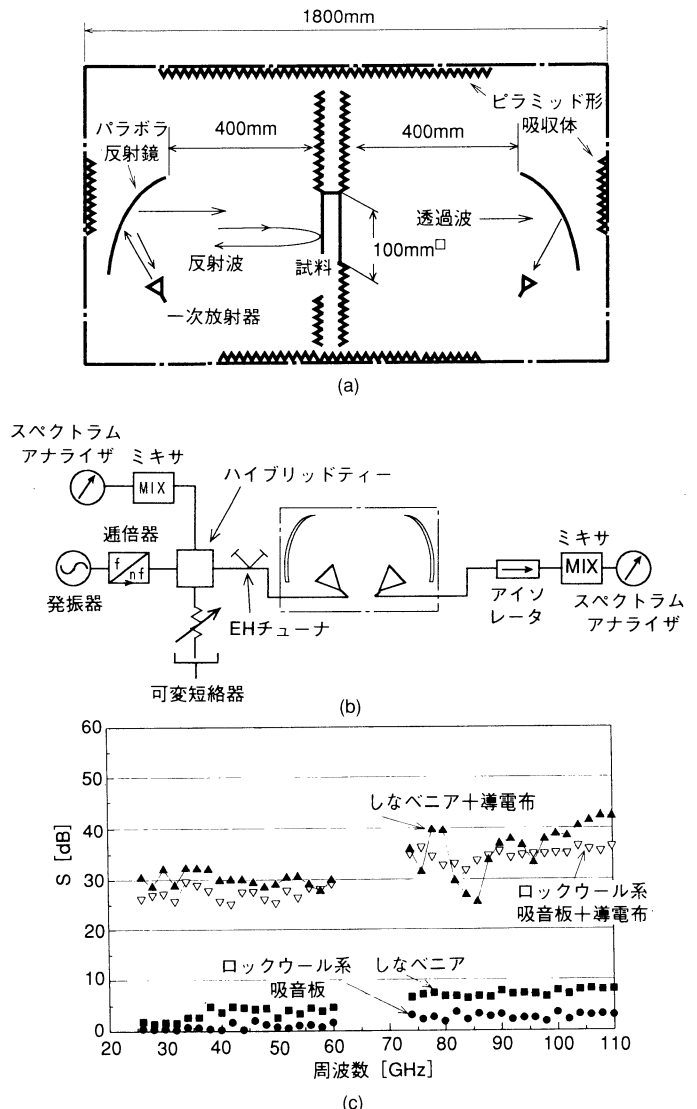


図9. 板状試料のミリ波での遮蔽量測定装置(a)(b)，測定例(c)

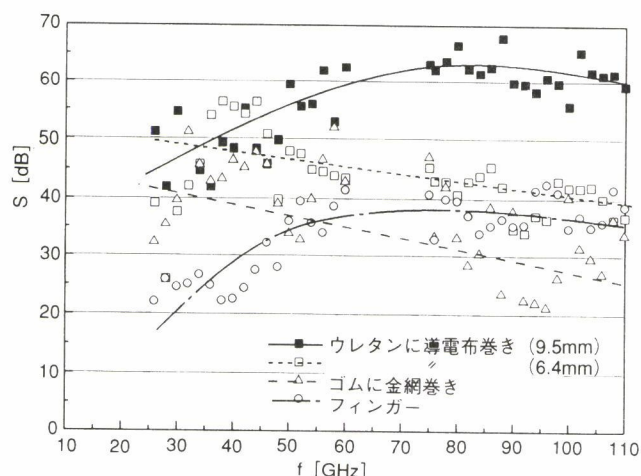
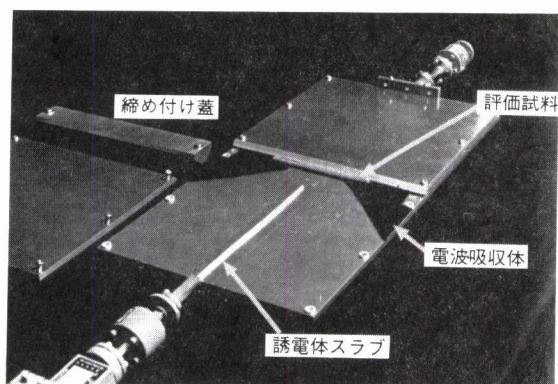


図10. 隙間用遮蔽材のミリ波での測定装置と測定例

と受信アンテナ間に試料を挿入するだけでは平面波入射を実現することが難しいのでパラボラアンテナを用いて試料に入射する電磁波の位相を揃え、平面波にしている。

図10は隙間用遮蔽材の測定装置と測定例を示す<sup>29)</sup>。2枚の金属板で構成した隙間に入れた誘電体ロッド(写真で白く見える部分)に電磁波が集中して伝搬し、ロッド先端から試料に向かって照射される。透過成分を反対側の受信ロッドで受ける。この構成にする利点は非常に周波数帯が広くとれることである。この例に示す寸法では10-100GHzが可能であり、現在考えられているミリ波周波数帯をほとんどカバーする。測定例が示すように、金網を巻いたゴム、フィンガーと呼ばれる金属状の圧着端子などの短絡回路形遮蔽材は、ミリ波では周波数が高くなると遮蔽量が小さくなるものがある。

## 5. 電波暗室

電波暗室は、アンテナ評価の際に周囲の建造物による散乱の影響を除くために用いられていたが、近年は電子機器の電磁波放射量を計測する設備としての需要が多くなった。どちらも、内壁面には電波吸収体を装着して電磁波の散乱を抑えており、また扉には電磁遮蔽を施して外部からの電磁波侵入を防ぎ、かつ内部で発生した電磁波を外部に漏らさないようになっている。ただし、アンテナ評価用では周波数帯が主に1GHz以上であること、内壁面全体を吸

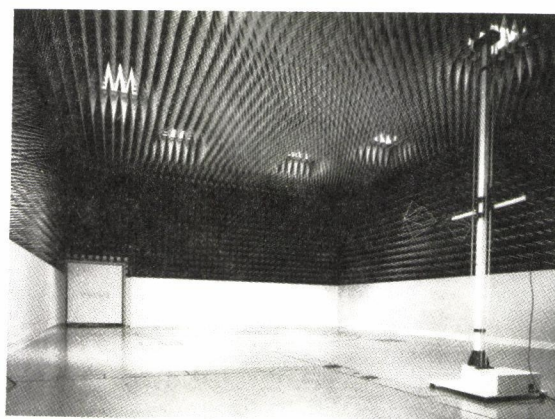


図11. 電波暗室

(写真はトーキンEMCエンジニアリング社殿のご好意により、カタログから引用)

収体で覆うこと、暗室としての性能評価は送受信アンテナを置く場所(クワイエットゾーン)の散乱波強度で行うこと<sup>(17)(27)(28)</sup>、などの仕様が適用されるが、一方電子機器の電磁波放射計測用としては、主な周波数帯は30MHz~1GHzであり、内壁のうち床面だけは金属面であること、暗室としての評価は送受信アンテナ間の伝搬特性で評価すること、などとなっており、若干の違いがある。そのため、アンテナ評価用と電磁波放射計測用の暗室とを兼用させることは、床面に吸収体があるかないかだけでなく、吸収体の特性から言っても通常は無理であると考えられている。しかし、このあたりを考慮した暗室も一部設計されている<sup>29)</sup>。今後は電磁波放射計測用の暗室でも1GHz以上まで周波数帯が拡張される動向であり、電磁波放射計測用と言えどもアンテナ評価用の設計法を取り入れた設計手法が求められるであろう。

どちらの電波暗室でも、内壁面には吸収帯域が非常に広く、吸収量が大きいピラミッド形吸収体(あるいは楔形)が用いられる。電磁波放射計測用の暗室では、低周波数帯でピラミッドがあまりに大きくなりすぎるのを防ぐため、フェライト焼結体タイルとの併用をすることが多い。ピラミッド形吸収材は吸収特性だけでなく、不燃化<sup>3)</sup>、軽量化などの材料開発も進んでいる。電波暗室と言うと電波的な特性だけに注目されがちであるが、使い勝手のよい設計が実際は大変重要であり、扉の配置や開閉法、照明、空調、内部と外部の連絡法、データ取得システム等、種々の工夫が凝らされている。図11に最近の電波暗室の一例を示す。

## 6. おわりに

電磁波吸収、遮蔽技術についてあらましを述べた。吸収、遮蔽技術は材料面、設計面ではよく似た技術であって、共通する事項も多いが、これを使用する立場では取り扱いはだいぶ異なってくる。本稿が、吸収体、遮蔽材を使用する立場の方、あるいは新たな吸収体、遮蔽材の開発を目指す方にとって一助になれば幸いである。

(1999.10.18-受理 1999.10.29-再受理)



文 献

- 1) K.Hatakeyama, H.Togawa: "Incombustible Electromagnetic Wave Absorber Made of Non-Woven Ceramic Fibers", IEEE Trans. on EMC, Vol.40, No.1, pp.27-32, 1998
- 2) 畠山賢一, 戸川 斉: "誘電体ロッドを装加した平行金属板線路によるマイクロ波からミリ波での電磁遮蔽測定法", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-B-II, No.6, pp.334-342, 1996
- 3) 小笠原直幸: "電気材料", 理工学社, pp.15-23, 1979
- 4) K.Hatakeyama, T.Inui: "Electromagnetic Wave Absorber Using Ferrite Absorbing Material Dispersed with Short Metal Fibers", IEEE Trans. on Mag., Vol.20, No.5, pp.1261-1263, 1984
- 5) 飯田修一, 他編: "光・マイクロ波磁気工学", 丸善, pp.7-9, 53-55, 1976
- 6) Y.Naito, K.Suetake: "Application of Ferrite to Electromagnetic Wave Absorber and Its Characteristics", IEEE Trans. on MTT, Vol.19, No.1, pp.65-72, 1971
- 7) 乾 哲司, 畠山賢一, 原田高志, 霞内 暁: "電波吸収体", NEC技報, Vol.37, pp.2-13, 1984
- 8) 乾 哲司, 小西巧一, 小田喜一: "六方晶Mg<sub>2</sub>Yフェライトを用いた広帯域電波吸収体", 電子情報通信学会全国大会, B-4-59, p.340, Mar.1999
- 9) 中村龍哉: "六方晶系フェライトの透磁率スペクトルとその電波吸収特性", 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会講演論文集 I, p.191, 1999
- 10) W.H.Emerson: "Electromagnetic Wave Absorbers and Anechoic Chambers Through the Years", IEEE Trans. on AP, Vol.21, No.4, pp.484-489, 1973
- 11) 内藤喜之: "フェライト吸収壁の厚さについて", 電子通信学会論文誌, Vol.52-B, No.1, pp.21-25, 1970
- 12) 内藤喜之, 水本哲弥: "電波吸収体ゴムフェライトへのカーボン添加効果", 電子通信学会論文誌, Vol.69-C, No.3, pp.257-261, 1986
- 13) 清水康敬, 西方敦博, 鈴木松一: "ゴムカーボンシートによるレーダ電波障害対策用吸収体", 電子通信学会技術研究会資料, EMCJ-84-16, 1984
- 14) K.Hatakeyama, T.Inui: "Ferrite Electromagnetic Wave Absorber Composed of Short Metal Fibers and Its Application", Int. Symp. on EMC, EMC'84 Tokyo, Vol.1, pp.504-508, 1984
- 15) 清水康敬: "ポイント周波数整合法による多層電波吸収体の設計", 電子通信学会論文誌, Vol.J62-B, No.4, pp.428-434, 1979
- 16) W.H.Emerson, A.G.Sand, M.V.Mcdowell: "Development of Broadband Absorbing Materials for Frequencies as Low as 500 MC", Naval Research Laboratory Report, NR 511

140, 1954

- 17) S.Galagan: "Understanding Microwave Absorbing Materials and Anechoic Chambers-Part1", Microwaves, pp.38-43, Dec.1969, "--Part2", Microwaves, pp.44-49, Jan, 1970, "--Part3", Microwaves, pp.47-50, Apr. 1970
- 18) A.Lehto, J.Tuovinen, A.Raesaenen: "Anechoic Chamber and Absorber Measurement at 110GHz and 183GHz", ISBN-951-22-0196-8, S-182, Mar. 1990
- 19) R.E.Hiatt, E.F.Knott, T.B.A.Senior: "A Study of VHF Absorbers and Anechoic Chambers", University of Michigan Technical Report (5391-1-F), Feb. 1963
- 20) V.Volpe: "Estimation of Electrical Conductivity and Electromagnetic Shielding Characteristics of Graphite/Epoxy Laminates", J.Composite Materials, Vol.14, pp.189-198, July 1980
- 21) 清水康敬, 他編: "電磁波の吸収と遮蔽", 日経技術図書, pp.224-252, 1999
- 22) 畠山賢一, 澤渡永吉: "磁性体シートによる電子機器筐体開口部から漏洩する電磁波の抑制法", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J71-B-II, No.3, pp.101-109, 1991
- 23) R.B.Schulz, V.C.Plantz, D.R.Brush: "Low-Frequency Shielding Resonance", IEEE Trans. on EMC, Vol.10, No.1, pp.7-15, 1968
- 24) 友野理平, 関 康雄, 編: "電磁シールドの基礎", シーエムシー, pp.179-208, 1984
- 25) 畠山賢一, 戸川 斉: "ミリ波帯での電磁波遮蔽, 吸収の簡易計測法", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-B-II, No.6, pp.651-656, 1998
- 26) K.Hatakeyama, H.Togawa: "Evaluation Method for Shielding Gasket at Microwave and Millimeter-Waves", IEEE Trans. on EMC, Vol.39, No.4, pp.349-355, 1997
- 27) J.Appel-Hansen: "Reflectivity Level of Radio Anechoic Chambers", IEEE Trans. on AP, Vol.21, No.4, pp.490-498, 1973
- 28) K.Hatakeyama, H.Togawa, T.Kawamura, Y.Sato: "Experimental Study on Direction Dependency of Reflection Coefficients of Microwave Electromagnetic Anechoic Chamber", IEEE Trans. on EMC, Vol.34, No.4, pp.397-403, 1992
- 29) 戸川 斉, 川村卓也, 佐藤由郎: "マイクロ波アンテナ計測・EMI計測兼用電波暗室", トーキョー技報, 第16号, pp.59-66, 1990. およびトーキン電波暗室カタログ



畠山 賢一 (はたけやま けんいち)  
昭和27年生まれ。昭和54年、東京都立大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。現在、姫路工業大学工学部電子工学科において、電磁環境、マイクロ波応用技術の研究に従事。