

フェライト電波吸収体

Ferrite Electromagnetic Wave Absorber

小塚洋司 東海大学工学部通信工学科

Y. Kotsuka, Department of Telecommunications, Tokai University

Demand for ferrite EM-absorbers is going to increase, particularly in the field of EMC (electro-magnetic compatibility) technology. They are used for anechoic chambers, for example, and to prevent TV ghosting, forged echos in ships' radar signals, and EM-wave leakage from various electric devices. The fundamental principle for the construction of a ferrite EM-wave absorber is based on the idea of a "magnetic resistive sheet" backed with a conductive plate. However, various types of ferrite absorber that depart from this principle have been developed recently. For instance, double-layered absorbers, consisting of carbon and ferrite materials, and grid ferrite absorbers are widely used for anechoic chambers. EM-wave absorber consisting of a concrete panel and a ferrite plate, or of a concrete panel containing ferrite particles to prevent TV ghosting, have been developed as materials for building walls. These ferrite materials include, sintered soft ferrite, rubber ferrite, plastic ferrite, and by-product ferrite. This paper first describes the fundamental principle of a ferrite absorber's construction and reviews trends in research on ferrite EM-wave absorbers. In response to recent broad EMC technology trends in EM-absorbers, simple methods for improving and changing the frequency characteristics of ferrite absorbers are introduced, such as the use of magnetized ferrite, ferrite combined with other materials, and ferrite with small holes.

Key words: soft ferrite, sintered ferrite, rubber ferrite, plastic ferrite, waste ferrite, EMC, anechoic chamber, EM-wave absorber, magnetized ferrite

1. はじめに

保磁力 0.1 Oe, 残留磁束密度 1200 G, 最大透磁率 500 …… この特性をもつ銅-亜鉛系のソフトフェライトが、初めて我が国で作製されたのは昭和 5 年のことであった。同年の暮れに東京工業大学の加藤与五郎、武井 武両博士によって提出されたこの特許は、昭和 10 年第 98844 号として登録されている。電気的に高い絶縁性を示し、また金属の半分以下の比重であるというこの新材料の発見は、それまでの磁心材料イコール良導体という概念を大きく覆す画期的なものであった。しかし、優れた多くの技術開発がそうであるように、このソフトフェライトも、当時の未発達

なエレクトロニクス技術と咬合しえず、実用化への道のりには険しいものがあつたと伝えられている¹⁾。この間、昭和 13 年にこのソフトフェライトは「オキサイドコア」の名称で商品化されるに至った。……それから半世紀余、今日ソフトフェライトは、各種電子通信機器をはじめ、電磁環境対策用電波吸収体や、医療応用に至るまでその用途は枚挙にいとまがない。

本稿では電波吸収体としてのフェライトを取り上げ、とくに最近需要が増しつつある環境電磁工学の分野における多様なニーズに対応すること、および材料有効利用の立場から、電波吸収特性や周波数特性を比較的簡単に変更する方法について紹介する。以下、まず吸収体の構成原理について述べ、フェライト電波吸収体の現状を概観し、広帯域にわたり電波を吸収する周波数特性を変更する技術としての「磁化フェライト電波吸収体」、「多媒質分布面電波吸収体」、「空孔フェライト電波吸収体」について述べる。

2. フェライト電波吸収体

2.1 構成原理

磁性体は周知のようにハード、ソフトと呼ばれる硬磁性、軟磁性材料に分類される。電波吸収体を構成するフェライトは、軟磁性つまりソフトフェライトが用いられている。一般にフェライトは、 $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ という分子式の磁性体で酸化物である。結晶構造の観点からは、逆スピネル構造で、通常 M として、 Ni^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} …… など 2 価の金属イオンを 2 種以上混合した「多結晶複合フェライト」が電波吸収体として使われている。

電波暗室やテレビゴースト対策などに用いられているフェライトは、高温、高圧下でセラミック状に焼成した「焼結フェライト」が主流であるが、これを数ミクロン程度に微粉末化し、ゴムやプラスチックに混入した「ゴムフェライト」や「プラスチックフェライト」の他、フェライト粒子や粉末を他の材料と混合した「複合型」も電波吸収体として使用されている。また、低コスト化や材料の有効利用の立場から「副生フェライト」が提案されている。

ところで、フェライトが電波吸収体としての機能をもつための基本原理は次のようである²⁾。

ここでは、まず初めに本誌の専門領域からややはずれる

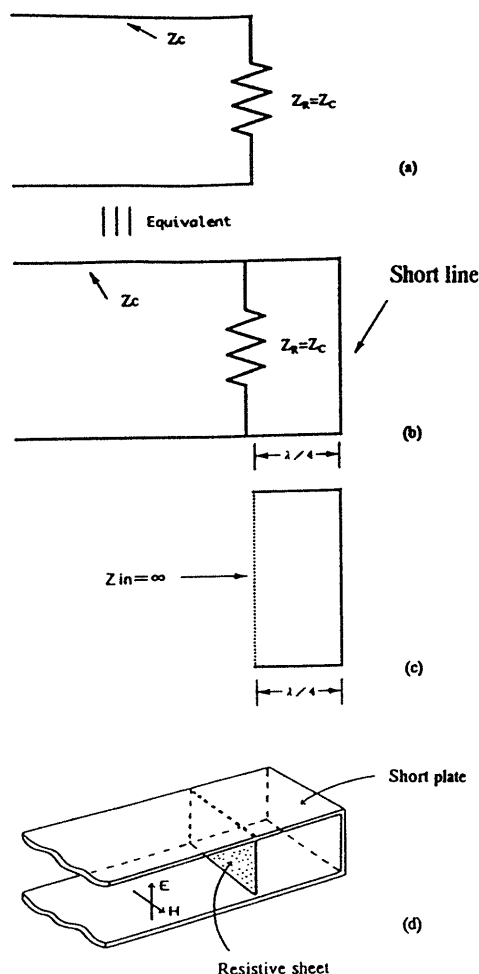


Fig. 1 Method of taking a match in a transmission line and slab-waveguide.

が、伝送線路理論を介して「導電性電波吸収体」の原理から解説していく。

平行な二導体線が電波を伝送することは、初期のテレビアンテナ用平行2線のフィーダーの例から想像されるであろう。いま、Fig. 1(a)のような高周波伝送線路を電波が伝搬している様子を考えてみる。伝送線路理論によればこの電波が、負荷インピーダンス Z_R (抵抗と考えてよい) によって吸収され (熱エネルギーに変換される) 反射しないための条件 (整合条件) は、 Z_R がこの線路がもつ特性インピーダンス Z_c に等しいときである。この条件は、Fig. 1(b)のように Z_R から $1/4$ 波長離れた箇所を短絡させることと等価な関係にある。その理由は、 Z_R から短絡側を見込む入力インピーダンス (Z_R の背面インピーダンス) Z_{in} は、Fig. 1(c)に示すように無限大になるからである。つまり、この Z_{in} は Z_R に対して並列に挿入されるが、 $Z_{in} = \infty$ であるから、実際にはこの Z_{in} が負荷に挿入されたことにはならないからである。

以上の基礎に立って、この伝送線路とほぼ等価な関係にある Fig. 1(d)に示す平行平板線路を考えてみる。この場合、上下の平行導体板間を自由空間 (導電率 $\sigma=0$) と仮定

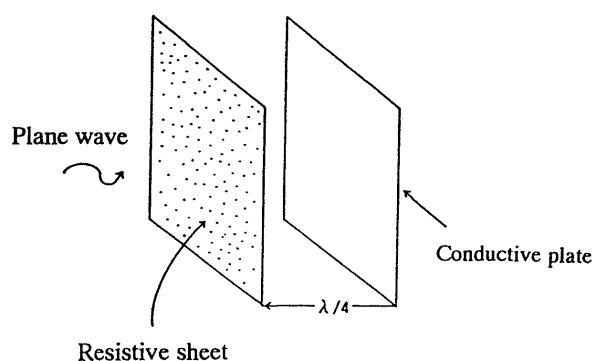


Fig. 2 Method of taking a match by using a resistive sheet.

すると、伝送線路の場合の Z_c に相当するインピーダンスは $120\pi(\Omega)$ ($\approx 377(\Omega)$: 真空媒質のインピーダンス) である。したがって、同図 (d) に示すように、この抵抗 $120\pi(\Omega)$ をもつ抵抗被膜 (基盤上に抵抗材を焼付けたたり蒸着したマイクロオーダーの薄い抵抗板) を張り、その後方 $\lambda/4$ 離れたところを短絡すれば、電波は吸収される (整合がとれる)。この平行平板線路を電波が伝搬していく電磁界の分布は、自由空間を平面波が伝搬していく場合と同じであるから、結局空間に Fig. 2 に示すように抵抗被膜と短絡板 (導体板) を配置すれば電波吸収体が構成できる。これが抵抗被膜を用いた「導電性電波吸収体」と称されているものの構成原理である。

ところで、この構成原理から、上述の電氣的抵抗被膜に対して、磁氣的な抵抗被膜の存在が類推される。実は、電氣的抵抗被膜と磁氣的抵抗被膜との間には双対関係が成立している。双対関係とは、伝送回路を例にとるならば、Table 1 のような関係が成立することである。つまり、一つの回路が、A の関係で表されている場合、これを B の関係で入れ替えて得られる新たな回路において、A による回路と類似な関係が成立する場合、このような性質を「双対性」という。この関係によれば、電氣的な抵抗被膜では、その背面インピーダンスが無限大であったが、この背面インピーダンスを零として磁氣的な抵抗被膜を用いれば「磁性抵抗被膜」による電波吸収体の構成が考えられる。すなわち、Fig. 3 に示すように薄い磁性体の板状のものを作り、これに短絡導体板を張りつけば (背面インピーダンス零の状態にする)、磁性電波吸収体が構成できる。そして、こ

Table 1 Example of dual principle

A		B
Series connection	←→	Parallel connection
Impedance	←→	Admittance
Voltage	←→	Current
Open	←→	Short

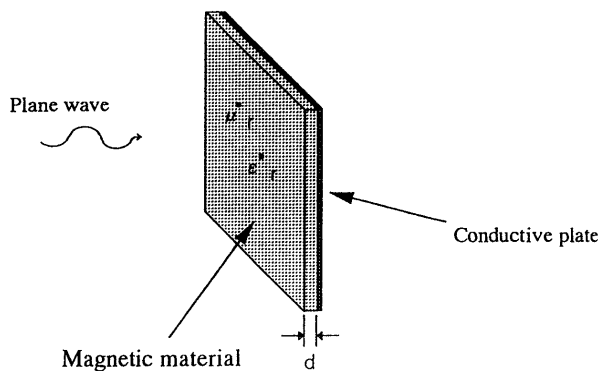


Fig. 3 Method of taking a match by using magnetic resistive sheet.

の磁性抵抗被膜を見込むインピーダンスが 120π (Ω) のとき、電波は完全に吸収される。これがフェライト電波吸収体の基本構成原理である。

この場合の整合条件、つまり電波を完全に吸収するときの条件は、入力インピーダンス Z_{in} と反射係数 S の式から、比透磁率を $\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r$ と表すとき、 $\mu''_r > \mu'_r \approx 1$ かつフェライト厚 $d_m = \lambda/2\pi\mu''_r$ で与えられる。この磁気抵抗被膜の考えは、これを円筒状に丸め減衰素子としても使われ、同軸管用マイクロ波減衰器^{3)~6)}や電波吸収テープに応用することができる⁷⁾。以上がフェライト電波吸収体の基本構成原理であるが、最近では用途に応じて以下に述べるような変形タイプも多く採用されている。

2.2 現状と動向

フェライトは、電波吸収材の中でも VHF 帯 (30~300 MHz) から SHF 帯 (3~30 GHz) の低域までの広帯域にわたり整合特性が得られること、薄く構成できることなどの特徴から、カーボン系の誘電性材料と並び、現在電波吸収体材料の主流をなしている。最近のフェライト電波吸収体の主な用途を分類すると Table 2 のようである。

(1) 電波暗室用：電波暗室とは、室内の壁面や天井に電波吸収体を張りめぐらし、電波反射をなくした部屋のことで、完全なものは、無限に広がる自由空間と等価な関係に

ある。最近では、この暗室を実体に則して忠実に電波無反射質 (anechoic chamber) と呼ぶ傾向にある。通常電波暗室は、外部からの妨害波の影響を受けてはならないアンテナの指向特性の実験や、各種電磁環境規制に従うべく電子、通信機器から発生する雑音評価のための測定などに使用され、近年特に需要が急増している。

この電波暗室にフェライトを用いたものとしては薄く構成してかつ VHF 帯からの広帯域特性の整合特性をもたせるために誘電性材料 (発泡スチロールとカーボンの混合体) とフェライトを組み合わせたものが早くから提案されてきた⁸⁾。この原理に基づき実用化されているものは電波入射側表面に山型やピラミッド型の誘電性材料を用い、これにフェライトタイルを密着させる構造である。また、フェライトだけで VHF 帯から UHF 帯領域の整合特性をもつものとして格子型 (グリッド) と呼ばれる電波吸収体が提案されている。最近では、電波暗室内に自動車を入れて、自動車が発する電波雑音を計測する場合もある。このために、暗室の床材は大地と等価な電波反射特性に構成する必要がある。この種の実現するものにもフェライトと抵抗フィルムによる多層構造のものが用いられている¹⁰⁾。

(2) 建造物壁面用：近年、高層建築物の増加に伴い、これら建造物による電波反射障害が電磁環境保全の問題として重要視されている。テレビ電波の場合には、これら建造物からの反射波と直接波によるテレビゴースト障害が引き起こされる。この問題に対し、ビルの壁面にフェライトを埋設し、電波を吸収する方法が開発されている¹¹⁾。この種のもは、東京都庁、大宮市産業文化センター他多くの建造物で実用化されている。特に都庁のものは、表面層が花崗岩、フェライト層、鉄筋、コンクリート層から成り、美観と電波吸収という二つの観点からの整合を図ったものである。また、セメントモルタルそのものにフェライトを混入し建造物壁面のコンクリートそのものを電波吸収体とする考え方が早くから提案され^{12), 13)}現在活発にこの種の研究が進められている^{14)~17)}。

(3) レーダ偽像防止対策用：本州四国連絡橋に代表されるような大型橋梁の建設が近年盛んになりこれからの反射電波による船舶レーダにおける“偽像”の発生が安全航行上問題となっている。これは、この種の大型橋梁からの反射電波により、実際には船の存在しない位置に船が存在するかのような偽像が現れる現象である。この対策に厚さ 2 mm 程度のゴムフェライト電波吸収体¹⁸⁾やフェライト粉末と誘電性粉体 (Ni メッキマイカ) から成る厚膜塗料¹⁹⁾などが提案されている。

(4) 電磁障害対策用：家電製品の中で電波を最も多く利用するものは電子レンジである。この電子レンジの扉のすき間からの電波漏洩が一時期問題となり、この対策としてこの部分にゴムフェライト電波吸収材などが使われてい

Table 2 Typical applications of ferrite absorber

Example of absorber	Type of absorber
Anechoic chamber	- Two-layered absorber consisting of carbon and ferrite - Ferrite single-layered absorber - Multi-layer absorber consisting of resistive film and ferrite (flooring in anechoic chamber)
Wall panel of building (countermeasure for TV ghosting)	- Absorber consisting of concrete (stone) panel and ferrite plate - Concrete absorber containing ferrite particles
Countermeasure for suppressing unnecessary echos in ships' radar signals	- Single rubber-ferrite absorber - Absorber of thick paint plate - Two-layered absorber consisting of metallic fiber and rubber ferrite
Countermeasure for leakage waves from electric devices	- Rubber ferrite absorber - Plastic ferrite absorber

る。また、電子レンジのマグネトロンから放射される第5高調波 (12.25 GHz) が衛星放送の受信に障害を起こすことが CISPR (国際無線障害特別委員会) から指摘され、このマグネトロン電源線に巻いて効果のあるゴムフェライトを用いた電波吸収テープが提案されている⁷⁾。

以上フェライト電波吸収体が応用されている現状を概観したが、高度情報化社会への進展に伴い、最近では、新たな用途に対する電波吸収体が要望されはじめている。前述したようにテレビゴースト対策として建造物外壁のコンクリート面を直接電波吸収体として構成するために、セメントに $10\mu\text{m}$ 以下の粒子状の Mn-Zn 系フェライトを混入し2層構造にしたもの¹⁴⁾、Mn-Zn 系や Ni-Zn 系焼結フェライトを粉砕して、セメントに混合し同じく2層構造にしたもの¹⁵⁾、コンクリート壁内の鉄筋にフェライトコアを装着するもの¹⁷⁾などの研究が建築分野で再び活発化している。

また、今後室内無線 LAN (Local Area Network) をはじめとする情報機器の無線による管理が進展するにつれて、ビルの室内において、これらの電波による共振や干渉の発生、他室への電波漏洩などの対策にも電波吸収体の採用が不可欠となるであろう。この環境では、単に電波を吸収するという特性のみならず採光性、通気性、装飾性などの要素をもつ機能的な電波吸収体の考え方へ発展していくことが予測される。筆者らは、この一つのコンセプトとして、室内装飾機能を有する電波吸収体“スタンドグラストタイプの電波吸収体”を提案している²⁰⁾。さらに各種情報通信機器のパーソナル化に対しても、電波吸収体が必要となる。従来これらの筐体には導電性樹脂や金属板が電磁遮蔽材として用いられてきた。しかし、雑音電波はわずかな隙間から漏洩し、また場合によっては筐体内で共振を引き起こす。このような観点から電磁遮蔽と同時に電磁波吸収も必要となってくる。今後この分野にフェライトを中心とした多くの電波吸収材が採用されていくことが見込まれる。

3. 整合周波数特性の変更法

上述のように電磁環境保全に対する認識に深まりとともに、電波吸収材の需要が急増している。これらの状況に迅速に対処するためにも、また材料の有効利用の立場から、新しい発想による電波吸収体設計技術の確立が必要であると思われる。これまで、後者の立場から開発されたものに副生フェライトがある^{21)~24)}。

フェライト電波吸収体は、各材料のもつ電気定数 (透磁率、誘電率) とこれに対応した固有の厚さ (整合厚) によって、実際の整合周波数特性が定まる。したがって、一度フェライト材が出来上がってしまえば、通常単一の整合周波数か、たかだか二周波数の帯域をもち、フェライト厚を調節しても、希望する他の周波数帯域で電波を吸収させることはできない。また、所望の周波数特性を実現すべく新

材料を開発するには、製造過程における素材の混合割合、焼成温度、加圧条件などの多分に経験的な高度な制御技術が要求され、一般に困難を極める。

筆者らは、こうした問題を回避するために、いったん出来上がった材料、つまり既存の材料だけを用い、しかも比較的簡単な手段で、広帯域にわたり整合周波数特性を変更する方法について研究を重ねてきた。これらの方法には、(i) フェライトを磁化する方法 (磁化フェライト電波吸収体) (ii) 異なる特性をもつタイル状フェライトを面状に分布させて、電波吸収体面を構成する方法 (多媒質分布面電波吸収体) (iii) 微小空孔を設ける方法 (空孔フェライト電波吸収体) などが考えられている。ここでは、これらの方法による構成法、整合周波数特性の変更特性などについて紹介する。

3.1 磁化フェライト電波吸収体

フェライトを磁化することによって、電波吸収体を薄層化でき、また整合周波数特性を変更しうる^{25)~28)}。この磁化フェライト電波吸収体の定在波特性の一例を Fig. 4 に示す。これは、円筒状フェライトを同軸管短絡導体の前面にこれと密着するように装荷し、定在波を測定したものである。同軸管外導体には、コイルが巻かれており、この直流電流 I の制御によってフェライト円筒面に垂直に、所定の静磁界を印加できるように構成されている。この場合のコイル電流とフェライト円筒表面上の垂直印加静磁界との間には、Fig. 5 の関係がある。Fig. 4 に示すようにこのフェライトは本来の整合厚は、6.2 mm で、0.2 GHz 前後で整合が取れる材料である。同図に示すように静磁界 H_{DC} を印加し、かつフェライト厚 d を薄くしていくことによって、整合の中心周波数が高周波域へ移行していく。

いまの場合、フェライト厚が薄く反磁界が大きいことから、フェライト内部の印加磁界は弱く未飽和領域の現象であるといえる²⁷⁾。したがって、およその定性的な考察はス

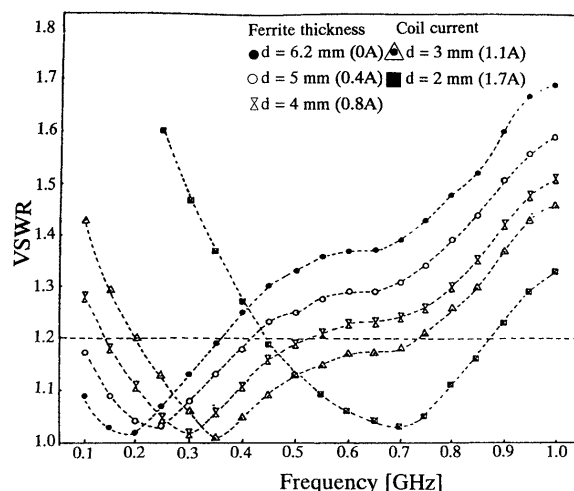


Fig. 4 Matching frequency characteristics controlled by a static magnetic field.

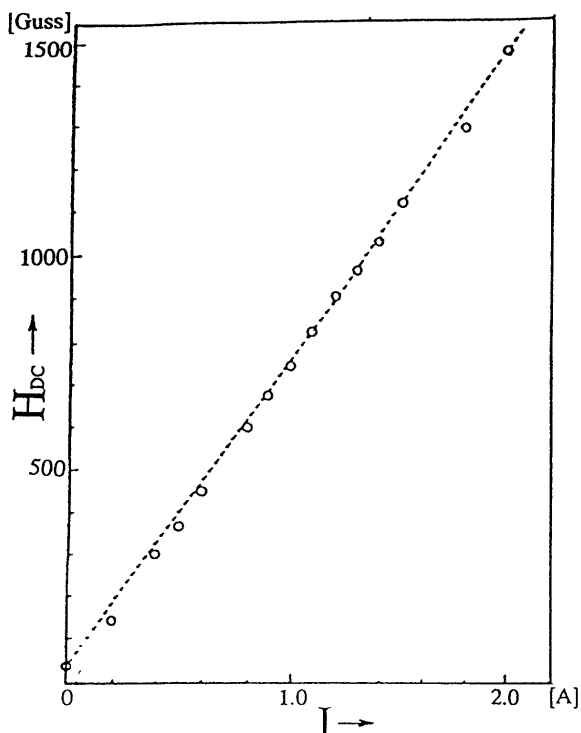


Fig. 5 Relation between a coil current and a static magnetic field.

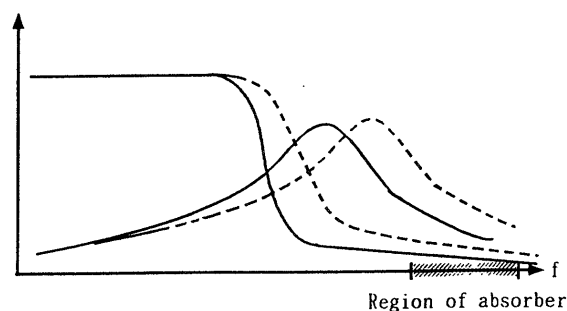


Fig. 6 Illustrating of the frequency characteristics of permeability.

カラ透磁率の立場からできる。すなわち、 H_{DC} をマイクロ波磁界と直交するように印加することによって Fig. 6 に示すように透磁率の実部、虚部ともに高周波側へシフトするように変化する。このため整合周波数を決定する主要なファクターである透磁率 $\mu_r (= \mu'_r - j\mu''_r)$ の実部の値のうち、 $\mu'_r = 1$ となる周波数が、高周波域へ移行する。また μ''_r の値も全体として高周波側へシフトするために、 μ''_r の値は同一帯域内で増加するように振舞い電波吸収に必要な値を維持している。この結果、整合周波数が高周波側へ移行すると考えられる。Fig. 4 の例は、Ni-Zn 系多結晶焼結フェライトの例であるが、一般にこの種のフェライトを磁化すると比較的低磁界で整合状態を実現出来、整合の比帯域幅 (B_m/f_0 : 定在波比が 1.2 以下の周波数帯域幅 B_m をその帯域の中心周波数 f_0 で割った値) も比較的大きくなるという特徴がある。

3.2 多媒質分布面フェライト電波吸収体

上述のように静磁界 H_{DC} とフェライト厚 d_m を同時に制御することによって整合周波数特性を変更することができる。しかし、これは VHF 帯、UHF 帯の比較的狭い帯域内での変更であった。マイクロ波帯で広帯域にわたり整合周波数を変更する方法として、Fig. 7 に示すように電波吸収体面を特性の異なる 2 種類以上のフェライトを分布させて構成する方法がある。これを「多媒質分布面電波吸収体」と呼んでいる²⁹⁾。さらに静磁界を印加し、同時にフェライト厚を調節して、1 GHz から 3 GHz 以上にわたり整合周波数特性を変更しうる。

いま、Fig. 8 に示すフェライト A 材、B 材はそれぞれ 500 MHz、800 MHz 前後に整合の中心周波数をもつ材料である。これらの材料をブロック状に構成し、整合厚は変えずに 1:9 の面積比で構成した場合は、Fig. 9 の白丸で

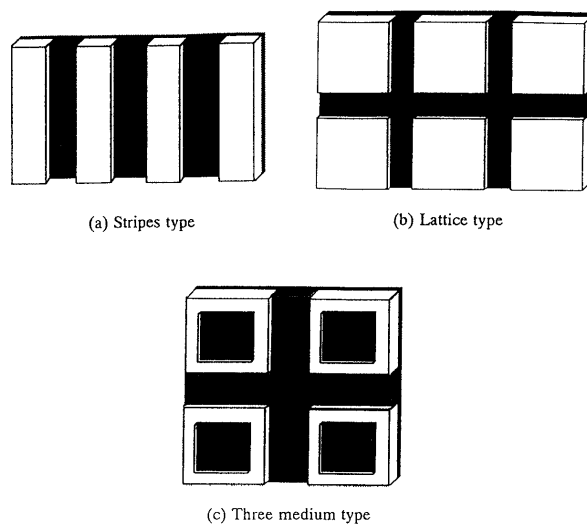


Fig. 7 Examples of a ferrite absorber combined with different kinds of ferrite.

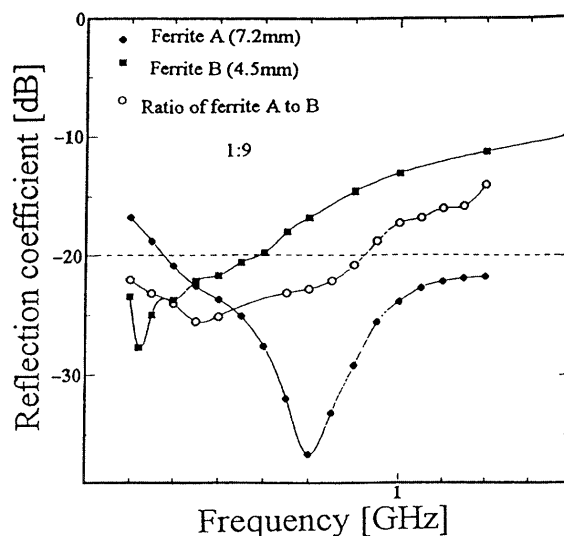


Fig. 8 Example of matching the characteristics of a combination-ferrite.

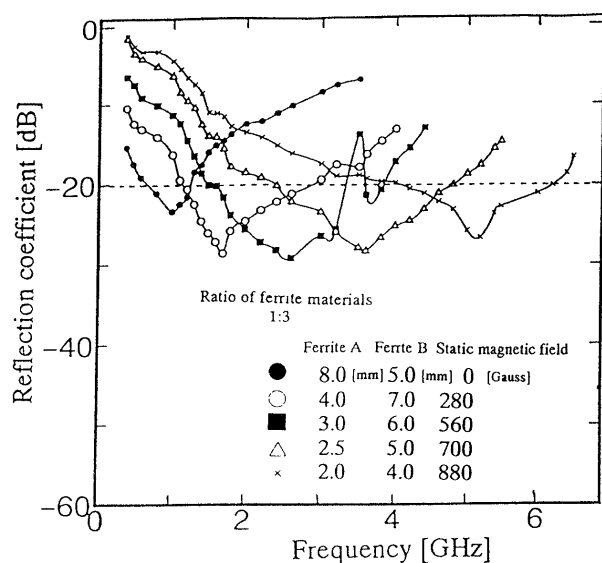


Fig. 9 Matching the frequency characteristics of a magnetized combination-ferrite (experiment).

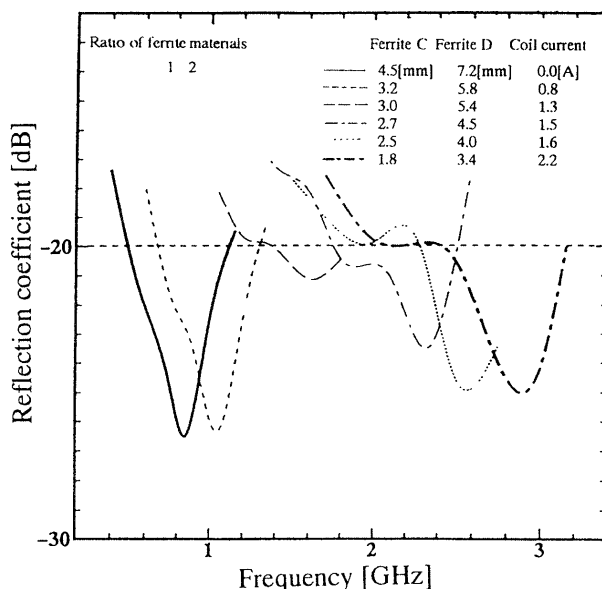


Fig. 10 Matching the frequency characteristics of a ferrite absorber combined like a lattice, taking each ferrite thickness, and static magnetic field as a parameter.

示すように、この二つの材料がもつ整合特性の中間的な整合周波数特性を実現することができる。しかし、この方法だけで広帯域にわたって、整合周波数を変更することはできない。そこで、整合周波数特性を広帯域にわたって変更させるために、(i) 各フェライトの占有面積を変更する。(ii) 各フェライト厚を変更する。(iii) 静磁界を印加するという三つの手段を採用する。一例として、Fig. 7(a) に示したストライプ状のものについて、整合周波数特性を変更した実測例を Fig. 9 示す。同図は、フェライトの占有面積を 1:3 に保って、印加静磁界（フェライト試料面上での垂直磁界）とフェライト厚を制御した場合を示している。約 0.6

GHz~6 GHz の広帯域にわたり整合周波数特性の変更が可能である。この理由に関しては、多媒質分布面全体からの反射係数を測定し、これから求めたマクロな実効透磁率特性を考えると、前節の磁化フェライトの場合と同様に透磁率特性の高周波側へのシフトの観点から説明できる。この方法は、占有面積比、フェライト厚、印加磁界と制御パラメーターが多く測定だけに頼って、この整合特性を説明することは困難である。このため現在 FDTD 法を導入して、この整合特性の解明を試みている。一例として、Fig. 7(b) に示した格子状の分布面に対する整合特性を解析した例を Fig. 10 に示す。この結果は、異なった特性を有するフェライトを分布させて電波吸収体を構成し、かつ静磁界を印加することによって整合周波数特性を大きく変更することができることを示唆している。

3.3 微小空孔フェライト電波吸収体

前節 3.2 多媒質分布面電波吸収体の構成は、やや複雑である。しかし、2 種あるいはそれ以上のフェライトを用いて、各フェライトの中間的な特性を得るのに、それぞれの材料を混合するのではなく、個体の形で分布させる考え方は、例えば、コア材などにも応用でき、磁気デバイスの特性変更にも有効と思われる。筆者は、癌温熱用のアプリケーション（磁界照射器）として、この多媒質分布面材の考え方に従うフェライトを提案している³⁰⁾。

さて、この節では、より簡単にマイクロ波帯における整合周波数特性を変更する手段として、フェライトに微小空孔を設けた「微小空孔フェライト電波吸収体」について述べる^{31), 32)}。この方法によって、(I) 整合周波数特性を広帯域にわたって変更できる。また (II) 整合がとれない材料に空孔を設けることによって整合状態を実現できる。(I) に関しては、すでに焼結フェライトを用いた実験的な検討が、UHF 帯でなされている³³⁾。しかし、空孔寸法、空孔間隔、透磁率特性と整合特性相互の関係については、これまで十分な検討がなされていない。ここでは、新たにゴムフェライトを用い、マイクロ波帯での整合周波数特性の変更法に関し、理論および実測により検討した結果について述べる。

Fig. 11 に、ここで検討したゴムフェライトの代表的な特性を示す。同図でフェライト A 材は、厚さ 7 mm で、整合の中心周波数約 2.2 GHz で整合がとれる材料である。また、B 材は、フェライト厚を変えても、この周波数帯域では、整合がとれない材料である。Fig. 12 は、A 材つまり整合がとれる材料に 4 mm の空孔直径を設けた場合の整合特性を示す。同図に示すように空孔数が 3~5 個と増加するにつれて整合周波数が高周波側へ移動することがわかる。次に、B 材すなわち、フェライト厚を変えても整合がとれない材料に空孔を設けた場合の整合特性を Fig. 13 に示す。同図から、直径 3 mm の円形空孔を 5 個設けた場合、整合特性が改善されていることがわかる。このように、既存の材料に空孔を設けるだけで整合特性を変更もしくは

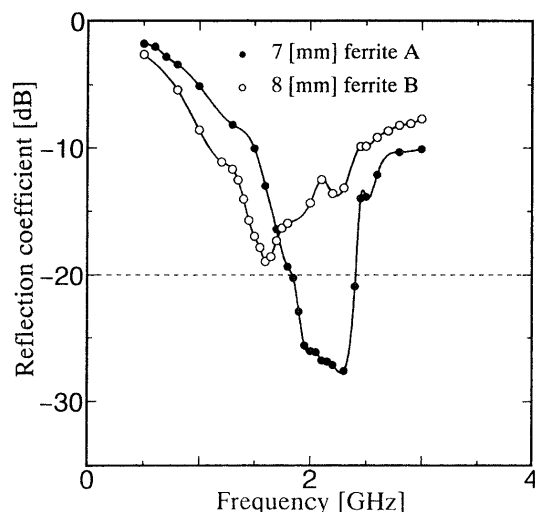


Fig. 11 Matching the characteristics of ferrite materials A and B.

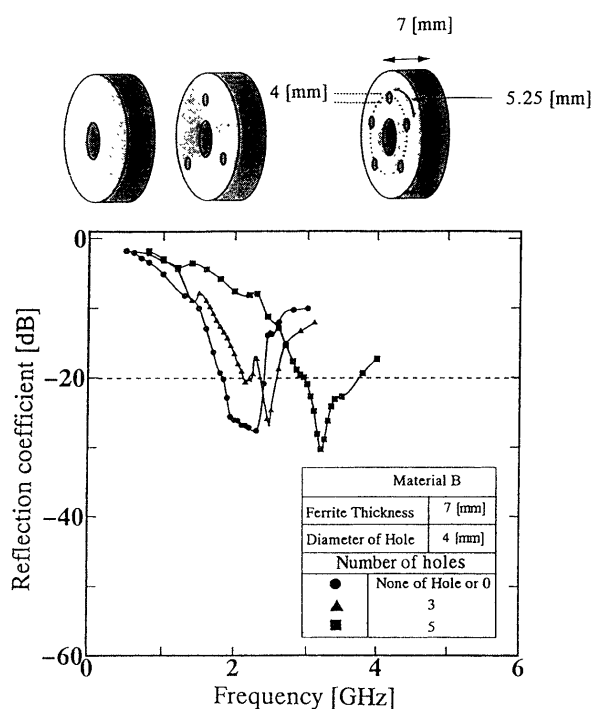


Fig. 12 Matching the characteristics of ferrite materials with holes. (Matching is taken with a ferrite thickness of 7 mm.)

改善が可能となる。この問題も空孔間隔、空孔寸法、空孔形状やフェライト厚の他、透磁率特性の変化など、整合特性に関するパラメーターが多く、実測だけで所望の特性や、体系的な特性を知ることは困難である。筆者らは、この問題に関しコンピュータ設計法を確立する立場から、「空間回路網法」を導入して、これら各種パラメーターの効果について検討している。この検討結果から、空孔フェライトでは、空孔間隔を一定にし、空孔直径を大きくしていくことによって、また空孔直径を一定にして空孔直径を狭めていくことによって、整合の中心周波数（最大減衰量をとる）は高域周波数へ移行していく傾向を示すことが判明

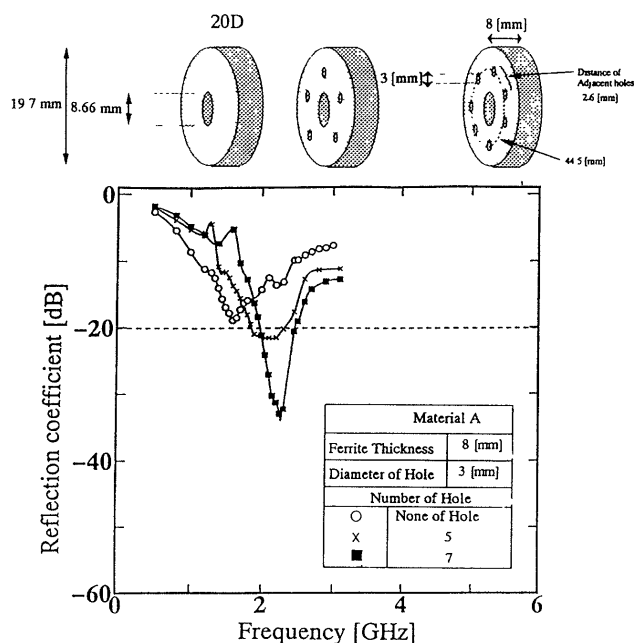


Fig. 13 Matching characteristics of ferrite material with holes. (Matching is not taken by the conventional method.)

している。また、空孔フェライトの透磁率特性と整合特性との関係については、必ずしも高透磁率の材料を空孔フェライト電波吸収材として用いる必要がないことが示唆されている。ゴムフェライトを用い空孔を設けることによって、種々の場合にかなり良好な特性が得られるのは、この理由に基づいていると考えられる。

4. ま と め

フェライト電波吸収体に関し、その構成原理、主な用途と最近の動向について概説し、電波吸収材の多様なニーズに迅速に対応すること、および材料の有効利用というやや変わった切り口からフェライト電波吸収体の解説を試みた。筆者らは、これまで、既存のフェライト材を用いて、磁化や多媒質化させたり、微小空孔を設けたりする手段で、マイクロ波帯における整合周波数特性の変更や改善をするという方法について提案してきた。

磁化フェライト電波吸収体に関しては、吸収体としての特性もさることながら、磁化させながらスピンや磁壁の振舞いを推定し、新しいフェライト吸収材を創り出す手掛りを得るという点でも意義があると思われるここで紹介させていただいた。これは、静止しているものを意図的に動かしてみ、その特性を知るという力学や電気磁気学で導入されている「仮想変位」の考え方や類似している。

また、多媒質分布面や微小空孔フェライト電波吸収体では、多くの材料製造に要求される主要な要素である混合割合、圧力、温度条件などを排除し、面積や体積、形状という幾何学的な要素だけで、しかも個々の材料の特性を活かして新たな特性を生み出すという考え方を重視したもので

ある。これらの手法における共通項は、既存の材料を用いることができる上、多種多様な特性を比較的簡単な手段で引き出せる点である。

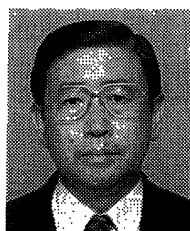
高度情報化社会の構築を目指した電子、情報通信技術の最近の著しい進歩は、一方では、これら電子機器がもたらす電磁環境保全の問題を提起しはじめている。複雑化していく電磁環境のさまざまなニーズに対し、迅速に対処していく上からも、種々の角度からの電波吸収材が検討されるべきであり、さしずめ「より広帯域に」「より薄く」が共通のキーワードであろう。

謝 辞 本稿の執筆に当たり、日本電気(株)資源環境技術研究所 原田高志氏にたいへんお世話になり、ここに謝意を表します。また、フェライト材を提供いただきましたTDK 電波事業部 橋本康雄氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 東京工業大学百年記念館資料。
- 2) 小塚洋司：電磁環境工学情報 EMC, **1**(3), 82-87 (1988)。
- 3) 小塚洋司，末武国弘：電子情報通信学会論文誌 (B), **58**(5), 195-202 (1975)。
- 4) 小塚洋司，末武国弘：電子情報通信学会論文誌 (B), **60**(1), 17-24 (1977)。
- 5) 小塚洋司，清水康敬，末武国弘：電子情報通信学会論文誌 (B), **60**, 117-124 (1977)。
- 6) Y. Kotsuka: Proceeding on ICF3, p. 172 (1980)。
- 7) Y. Kotsuka: Proceeding on 1984 Int. on EMC, 18ADI, pp. 708-713 (1984)。
- 8) 清水康系敬，末武国弘，内藤善之，若山一郎：電子情報通信学会論文誌 (B), **53**, 7 (1970)。
- 9) 内藤善之，高橋道晴，安斎弘樹，水本哲弥：電子情報通信学会論文誌 (B-II), **J76**, 898-905 (1993)。
- 10) 石野 健：電子情報通信学会技術報告，**MW86-57**, 35-40 (1986)。
- 11) Y. Hashimoto, K. Ishino, and Y. Shimizu: Int. Symp. on EMC, pp. 788-791 (Nagoya, 1989)。
- 12) 菰岡真人，西方敦博，清水康敬：電子情報通信学会総合全国大会，**125-94**, 7-194 (1987)。
- 13) 橋本康雄，栗原 弘，平井義人，石野 健，清水康敬：電子情報通信学会論文誌 (B-II), **J75**(1), 103-111 (1992)。
- 14) 川本善也，岡島達雄，河辺伸二：日本建築学会学術講演梗概集，pp. 157-158 (1995)。
- 15) 田中一哉，田中秀男，山田哲夫，吉竹増実，小坂征雄：日本建築学会学術講演梗概集，pp. 161-162 (1995)。
- 16) ウィグナラージャ シバクマラン，稲垣正幸，宮崎弘志，二宮善吾：日本建築学会学術講演梗概集，pp. 163-164 (1995)。
- 17) 宮崎弘志，吉野涼二，佐川祐一郎，三宅伸幸：日本建築学会学術講演梗概集，pp. 1063-1064 (1995)。
- 18) 清水康敬，杉浦 行，石野 健，乾 哲司(編)：電磁波の吸収と遮蔽 (日経技術図書，1989)。
- 19) 橋本康雄，石野 健，清水康敬：電子情報通信学会論文誌 (B-II), **J73**(4), 214-223 (1990)。
- 20) Y. Kotsuka and A. Maeda: APMC, II, pp. 467-470 (1994)。
- 21) K. Hatakeyama and T. Inui: *IEEE Trans. Magn.*, **20**, 5 (1984)。
- 22) 原田高志，畠山賢一，乾 哲司：電子情報通信学会全国大会，No. 894 (1984)。
- 23) 原田高志，林 昌世：NEC 技報，**44**, 5 (1991)。
- 24) U. Jha and A. K. Banthia: Proc. ICF-5 (India, 1989)。
- 25) 小塚洋司：電子情報通信学会・電波部門全国大会，pp. 1-108 (1982)。
- 26) 小塚洋司：電子情報通信学会，**EMCJ-83-78**, 1-6 (1983)。
- 27) 小塚洋司：電子情報通信学会，**EMCJ-82-87**, 29-34 (1988)。
- 28) Y. Kotsuka: Int. Symp. on EMC, pp. 780-783 (Nagoya, 1989)。
- 29) Y. Kotsuka, K. Nozasa, and A. Maeda: 1994 Int. Symp. on EMC, pp. 505-508 (Sendai, 1994)。
- 30) 特許，平 2-403927。
- 31) 前田篤志，小塚洋司：電子情報通信学会技術報告，**MW96-40**, 1-6 (1996)。
- 32) Y. Kotsuka and A. Maeda: Proc. of PIERS, 1997, p. 20 (Hong Kong, 1997)。
- 33) 脇田俊昭，清水康敬，末武国弘：電子情報通信学会全国大会，No. 929 (1974)。

(1997年7月7日受理)



小塚洋司 こつか ようじ

昭46 明治大学大学院博士課程修了，昭49 東京工業大学を経て東海大学専任講師，同大学助教授を経て，昭59 同教授，昭55 東京工業大学から工学博士を授与される。平7 ハーバード大学客員教授，EMCに関する研究に従事，現在に至る。
専門 電磁波工学 (工博)