

電磁波吸収材料の最近の開発動向

Recent Trends in the Development of Microwave Absorption Materials

杉本 諭 東北大学大学院工学研究科材料物性学専攻

S. Sugimoto, Graduate School of Engineering, Tohoku University

Recently, the use of microwaves in the GHz range has increased because of the demand for transmission of large amounts of data. However, the problem of electromagnetic interference (EMI) has become increasingly serious, and much attention has therefore been paid to microwave absorption materials. This paper describes recent trends in the development of microwave absorption and noise suppression materials.

Key words: electromagnetic interference (EMI), electromagnetic compatibility (EMC), microwave absorber, noise suppression, resonance frequency, reflection loss, permeability, power loss

1. はじめに

情報通信技術の発達に伴い、高周波域で動作する電子機器の普及には目を見張るものがある。例えば身近な情報通信機器である携帯電話の契約台数はすでに 8000 万台を突破し、日本の全人口の 3 分の 2 以上が利用している。この傾向は第 4 世代携帯電話、無線 LAN、情報家電の出現によってさらに加速すると予想され、通信に利用される電波の周波数帯もマイクロ波帯からミリ波帯へと広がってきている。換言すれば我々の身の回りには、電子機器によって発生する人工的電磁波が数多く存在することになる。

一方、光ファイバー網などの有線と無線のネットワークの融合が進み、将来ではいつでもネットワークにつながって情報交換が可能となる「ユビキタス」社会が間近となっている。「ユビキタス」社会の構築には、各種通信デバイスの小型化・薄肉化とともに高速デジタル化と低電圧駆動化による通信デバイス自体の高性能化が要求されている。しかしながら高速デジタル化は不要電磁波の放射、低電圧駆動化はノイズによる誤作動を誘発し、機器間での電磁波障害 (EMI) を引き起こす。このため不要電磁波を放出しないことと外来ノイズに対して強い耐力をもつことを両立させる電磁的両立性 (EMC) が注目されてきている。

EMI を防止する方法としては、電子機器の回路設計を最適化してノイズを減らす方法などがあるが、効果的なものに電磁波シールド材や電磁波吸収体を利用する方法がある。前者は、発信源からの電磁波を封じ込めたり、逆に外部からの電磁波をはねかえす反射体であり、後者は電磁波のエネルギーを材料内部で熱エネルギーに変えるなどして反射

をなくす吸収体である。本解説ではこれらの状況を踏まえ、電磁波吸収材料の研究開発動向について紹介する。

なお、最近本学会誌において電磁波吸収体の設計方法を含めた解説が橋本¹⁾によってなされている。また同著者による書籍のほか電磁波吸収体に関して多数の書籍が出版されており、こちらも参照されたい^{2)~7)}。

2. 電磁波吸収体の利用方法

最近の電磁波吸収材料は、その利用方法、周波数によって設計方法、材料選択が細分化されてきたといえる。不適當であるかもしれないが大別すれば従来の遠方界対応の電磁波吸収体と機器内部における伝導ノイズ低減を図る近傍界対応の電磁波ノイズ抑制体に分けられると考えられる。これは Fig. 1⁸⁾ のように電磁波の発生源からの距離によって波動インピーダンスが変化することに起因している。すなわち波源からの距離が遠い遠方界では、波動インピーダンスが 377Ω と自由空間と同じになり、電磁波は平面波として進行する^{6)~8)}。これに対して波源からの距離が近い近傍界の場合では、波動インピーダンスが波源によって電界支配と磁界支配となり、さらに距離により大きく変化する。また電磁波も球面波となって進行する。このため電磁波吸収体の設計方法、評価方法ならびに評価値、使用方法などが異なってくる。

以下では、遠方界対応と近傍界対応の電磁波吸収体材料

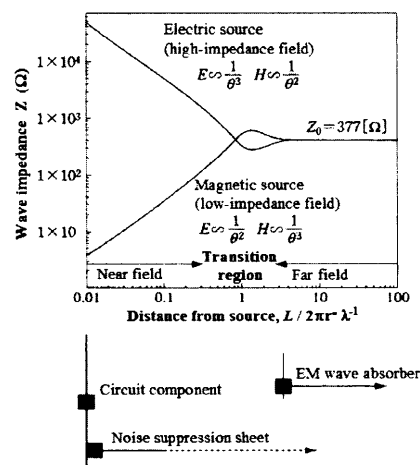


Fig. 1 Relationship between wave impedance and distance from the source.⁸⁾

に分け、最近の研究開発動向について紹介する。

3. 遠方界対応電磁波吸収体

3.1 電磁波吸収体の分類と設計

電磁波吸収体材料を分類すると、導電損失、誘電損失、磁性損失を用いたものに分類される。これらの材料を用いて単層型電磁波吸収体を設計する場合には、Fig. 2(a)のように波長の1/4の厚さをもつ無損失材を金属板で裏打ちし、その表面には面抵抗値が自由空間の波動インピーダンス値である導電損失材(抵抗膜)を付けた構造($\lambda/4$ 型)や、Fig. 2(b)のように誘電損失、磁性損失材料の背面に金属板を付けた構造をもつようなインピーダンス整合型電磁波吸収体として設計される^{2)~7)}。前者は金属板と抵抗膜の間が無損失材のため内部での吸収はないが、その厚さを波長の1/4厚にすることにより、内部反射波の合計が表面反射波と逆位相で同振幅となるよう設計されている⁴⁾。後者は損失材内部における電磁波吸収のみならず、損失材表面と裏打ち金属板間で多重反射を起こさせ、反射波の相互干渉を効率よく利用して電磁波を吸収するものである。

また、これらの構造を多層化または形状をウェッジやピラミッド構造として断面積を徐々に変化させることにより周波数特性の広帯域化を図っている^{3), 7)}。

3.2 電磁波吸収体の評価

複素比透磁率が μ_r 、複素比誘電率が ϵ_r 、厚さが d なる材料を用いた電磁波吸収体に平面電磁波が垂直に入射する際、吸収体前面におけるインピーダンス Z_{in} は(1)式のようになる。

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \tanh(j(2\pi f d / c) \sqrt{\epsilon_r \mu_r}) \quad (1)$$

ここで、 Z_0 は自由空間の波動インピーダンス、 f は電磁波の周波数、 c は光速である。このとき吸収体の電磁波吸収率を表す入射面における反射損失(R.L.)は次式で表される。

$$R.L. = 20 \log |Z_{in} - Z_0 / Z_{in} + Z_0| \quad (2)$$

吸収体が電磁波をすべて吸収する(吸収体からの電磁波の反射がなくなる)条件は $R.L. = -\infty$ ($Z_{in} = Z_0$)である。しか

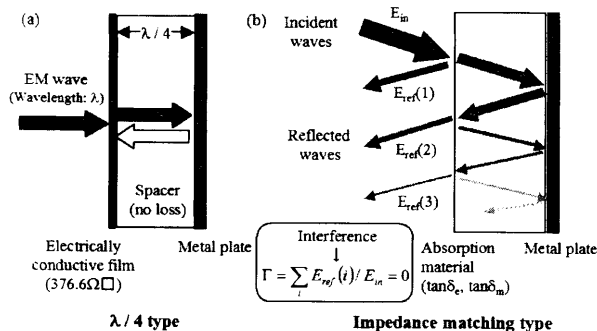


Fig. 2 Schematic illustrations of (a) $\lambda/4$ -type and (b) impedance-matching-type microwave absorbers.

し、実際にこの条件を満たすのは難しく、一般の通信・電子機器の場合、R.L. が -20 dB以下(99%の電磁波吸収)を電磁波吸収体としての要求目安としている。またその際の周波数を整合周波数 f_m 、吸収体の厚さを整合厚さ d_m と呼んでいる。

3.3 電磁波吸収体材料

3.3.1 抵抗皮膜型($\lambda/4$ 型)電磁波吸収体 $\lambda/4$ 型電磁波吸収体は無損失材の厚さを制御することによりさまざまな周波数に対応できる電磁波吸収体となる。しかし低周波数域では電磁波の波長は長く吸収体の厚さも厚くなるため、このタイプの電磁波吸収体は主として波長の短い帯域で利用されている。抵抗皮膜としては金属皮膜以外に、後述する金属パターン型電波吸収体のように導電性繊維を縦横格子状に織り込んだものもあり、格子間隔を変えることにより面抵抗値を変化させている⁴⁾。また最近では、Fig. 3に示すように面抵抗値が自由空間のインピーダンスと同じ酸化インジウムスズ薄膜をガラスに貼り付け、このガラス材を2枚使い、間に空気を挟み込む形で透明電磁波吸収体なども開発されている^{3), 4), 9)}。

一方、 $\lambda/4$ 型電磁波吸収体では周波数選択性を示すFSS (Frequency Selective Surfaces) を用いることにより薄型

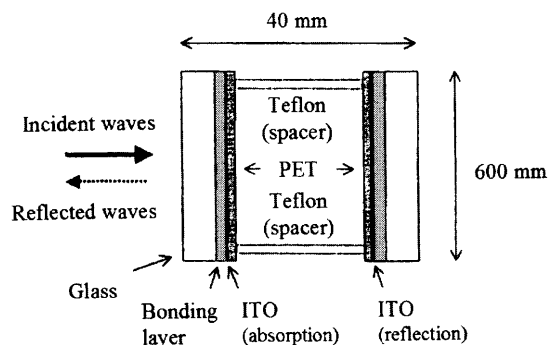


Fig. 3 Structure of a $\lambda/4$ -type microwave absorber using ITO.^{3), 4), 9)}

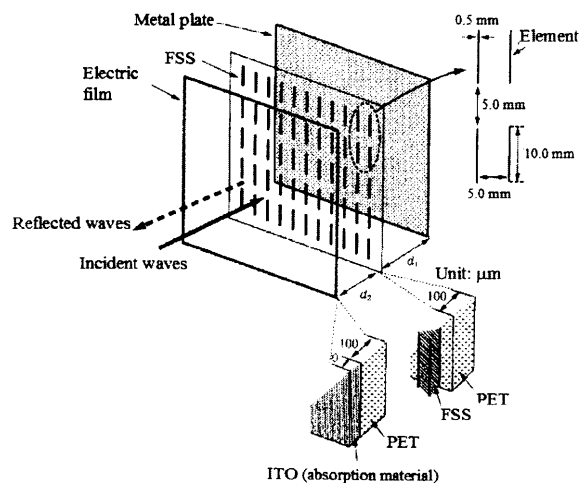


Fig. 4 Structure of a $\lambda/4$ -type microwave absorber using FSS.²⁾

化が図られている。FSS とは一定の長さに合わせた直線状エレメントを規則的に配置したものであり、これを Fig. 4²⁾ のように $\lambda/4$ 型電磁波吸収体のスペーサ部内に抵抗皮膜と並列に挿入した構成をとっている。橋本ら²⁾は、衛星放送などに使われる 10 GHz 帯用の吸収体を FSS を入れた 3 層構造とすることにより 7.5 mm 程度の厚さから 3.77 mm まで低下させられることを示している^{2), 10)~12)}。

3.3.2 誘電損失電磁波吸収体 誘電損失材料による電磁波吸収体は、ゴムやプラスチック、コンクリートなどの絶縁体中にカーボンブラック、カーボンファイバー、金属粉、金属ファイバーなどの導電性材料を分散させた複合材料として設計される⁴⁾。誘電損失材料においては複素比透磁率 μ_r が 1 であるので、(1), (2) 式を満足させる無反射条件は複素比誘電率 ϵ_r と吸収体の厚さ d によって変化する。複素比誘電率とその周波数依存性は混合する材料や混合比によってが変化するため、一般には複素比誘電率の実験式を求めて電磁波吸収体を設計する^{3), 7)}。カーボンなどの導電性材料を用いると後述するスピネル型フェライト粉末を用いた場合と比べて軽くなるため、発砲スチロール、ウレタンなどと複合化し、ウェッジ型、ピラミッド型として広帯域特性をもつ電磁波吸収体が作製されている。

3.3.3 磁性損失電磁波吸収体 吸収体として用いられる磁性損失材料は、MHz~GHz 帯域において複素比誘電率 ϵ_r は周波数によらず一定ではあるが、その値は 1 ではなく材料によって変化する。また、複素比透磁率 μ_r も周波数依存性を示す。このため (1), (2) 式における $Z_{in} \approx Z_0$ となる条件は ϵ_r, μ_r, d, f の変数によって決まり、他の材料を用いた場合と比べて材料定数に自由度が多く、比較的薄形で広帯域特性の吸収体が設計できるとされている³⁾。この磁性損失材料を用いた電磁波吸収体を設計する場合に重要となるのは磁気共鳴現象である。一般に電磁波吸収体は磁気損失を示す複素比透磁率の虚部 μ_r'' が高く、実部 μ_r' が低い周波数域で用いられるが、共鳴現象が生じる周波数域では μ_r' が低下するとともに μ_r'' が高くなるため、これを利用することができる。高周波域で生じる自然共鳴の周波数 f_r は磁性体の異方性磁界 H_A と次式の関係があり、

$$f_r = (\gamma/2\pi)H_A \quad (3)$$

以下これらを有効に利用した電磁波吸収体材料について概説する。

(1) スピネル型フェライト

汎用の電磁波吸収体材料としては MHz 帯域で高い μ_r を示すスピネル型フェライトがあり、その焼結体や樹脂との複合体がこれまでに VHF 帯の TV 放送波のゴースト防止¹³⁾、ノイズ対策用インピーダンス素子などに用いられてきた。しかしスピネル型フェライトは、飽和磁化 I_s が小さいため、(4) 式の関係で示される Snoek の限界と呼ばれる周波数限界が数 GHz に存在する。ここで γ は磁気回転比、 μ_0 は真空の透磁率、 I_s は飽和磁化である。

$$f_r(\mu_r - 1) = (\gamma/3\pi\mu_0)I_s \quad (4)$$

このため数 GHz 以上では μ_r'' が低下し良好な電磁波吸収特性は得られないことになるが、内藤と藤原¹⁴⁾、Kim ら¹⁵⁾、Lee と Kim¹⁶⁾ は種々のスピネル型フェライト粉をゴムや樹脂と複合化させ、高周波領域でも対応可能な電磁波吸収体を開発している。また、(3) 式より異方性磁界の高い材料では共鳴周波数が高周波側へシフトするため、Cho ら¹⁷⁾、Kang ら¹⁸⁾ は NiZn フェライトに Co を添加した樹脂複合体を作製し、 $f_m = 10 \sim 15$ GHz で $d_m = 3 \sim 6$ mm なる特性を報告している。

(2) プレーナ型 (Y, Z 型) 六方晶フェライト

プレーナ型 (Y, Z 型) 六方晶フェライトは c 軸方向と c 面方向の異方性磁界 H_{A1} と H_{A2} が大幅に異なり、 c 面が磁化容易面であることが特徴である。したがって f_r と μ_r' の関係は、

$$f_r(\mu_r' - 1) = (\gamma I_s / 3\pi\mu_0) [(1/2)\sqrt{H_{A1}/H_{A2}} + (1/2)\sqrt{H_{A2}/H_{A1}}] \quad (5)$$

となり、右辺のカッコ内は 1 以上となるため、同じ I_s と μ_r' の等方性あるいは一軸異方性フェライトと比較して高い共鳴周波数をもつ^{19), 20)}。結果的にその共鳴周波数はスピネル型フェライトの Snoek の限界を超える。Kwon ら²¹⁾、Shin と Oh²²⁾、小田と乾²³⁾ は Y 型フェライトを用いることにより ~ 20 GHz に対応可能な電磁波吸収体が作製できると述べている。また、Matsumoto と Miyata²⁴⁾ は組成式 $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ で表される Co_2 -Z フェライトを用い、 $f_m = 0.9 \sim 1.8$ GHz、 $d_m = 4.5 \sim 6.7$ mm の電磁波吸収特性を報告している。

(3) スリット型電磁波吸収体

小塚ら^{25), 26)} は単一の磁性材料を用いた電波吸収体を有効に利用するため、傾斜スリット状の空孔や十文字型の空孔を開けた電波吸収体の特性を調べている。この結果空孔の寸法および吸収材の厚さを調整することで、電磁波吸収 (整合) 特性を広帯域にわたり変更できることを明らかにしている。例えばスリット状空孔の場合、幅 1~8 mm、長さ 10~14 mm、間隔 2 mm としたとき約 2.0~4.0 GHz の広帯域にわたり良好な整合特性が得られることを示している。これは空孔を設けることにより吸収材の比誘電率が減少することによって整合周波数帯域が高周波側に移行するためであると説明されている。

(4) 金属パターン型電磁波吸収体

天野と小塚^{27), 28)} は吸収体の表面に導体を設け、導体相互の間隔および導体幅を変化させることで整合特性を低周波側に移動させ、2.45 GHz で -20 dB 以下の電磁波吸収特性を示す厚さ 2 mm の吸収材を開発している。

一方、長野ら^{29)~31)} は後述する BaM フェライトや MnZn フェライトなどの損失材表面に、フォトリソグラフィで配列円形金属パターン層を形成させたマイクロ波用電磁波吸収体を開発している。この結果、薄型化が可能

となり、ITS 用 (5.8 GHz 帯) 電波吸収体として有望であることを報告している。

(5) 軟磁性金属粉末を用いた電磁波吸収体

(4) 式で示した Snoek の理論に基づけば、 I_s が高くなれば高周波域まで高い透磁率を保つ。すなわち上記のスピネル系フェライトに比べ 2 倍程度の飽和磁化をもつ軟磁性金属材料を用い、還流磁区や渦電流を抑えれば、スピネル型フェライトよりも優れた高周波特性が得られる。吉田ら^{32)~34)}は、Fig. 5(a)^{8), 32)~34)} のようにセンダスト合金 (Fe-Si-Al) 粉を加工し、表皮深さ程度の厚さとした扁平状粉末を樹脂と複合化することを提案した。扁平状に加工することにより、形状異方性および残留応力による磁気弾性効果の寄与が生じ、 μ_r'' の周波数依存性が Fig. 5(b)^{8), 32)~34)} のように広帯域または双峰形となって共鳴周波数が増加し、300 MHz~3 GHz に対応できるとされている。現在、この複合シートは後述の電磁波ノイズ抑制体としてさまざまな電子機器内の EMC 対策に利用されている。

一方、遠方界の電磁波吸収特性では内藤ら³⁵⁾が Fe-Si-Al 合金粉末-樹脂複合体において $f_m = 900$ MHz で $d_m = 19$ mm, 1.18 GHz で 18.1 mm, 4.9 GHz で 4.6 mm なる値を、カルボニル鉄粉-樹脂複合体において 1.7 GHz で 6.3 mm の値を報告している。カルボニル鉄粉樹脂複合体においてカップリング剤添加による充填率の向上も松本と宮田³⁶⁾により報告されている。最近では、カルボニル鉄粉とシリカをメカニカルアロイングし、10 nm の Fe 粒子が非晶質 Si 酸化物に囲まれたナノグラニュー組織を形成させ、6 GHz 近傍で吸収量を 30% 上昇させた材料も報告されている³⁷⁾。また斎藤ら³⁸⁾は、箔片化電磁ステンレス鋼-樹脂複合体にて数 GHz から 20 GHz に対応できる電波吸収体を作製している。

(6) マグネトプランバイト (M) 型フェライト

マグネトプランバイト (M) 型構造を有する $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ フェライトは一軸磁気異方性を示し、異方性磁界 H_A が

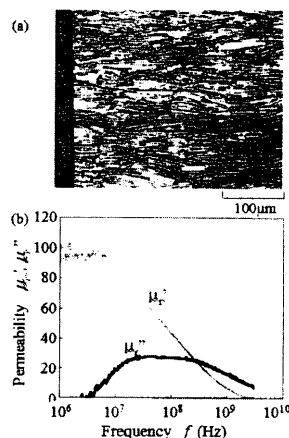


Fig. 5 (a) Microstructure and (b) frequency dependence of the permeability of a Fe-Si-Al composite sheet.⁸⁾

1.38 MA m^{-1} と大きいため永久磁石として用いられている。筆者ら^{39)~41)}はこの M 型フェライトの自然共鳴周波数 f_r が (3) 式から 48.9 GHz となることに着目し Fe^{3+} を種々の金属イオンで置換した M 型フェライトの電磁波吸収特性を調べた。その結果、 $(\text{Ti}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})^{3+}$ で置換した $\text{BaFe}_{9.0}(\text{Ti}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_{3.0}\text{O}_{19}$ 焼結体において整合周波数 $f_m = 12.35$ GHz, 整合厚さ $d_m = 0.58$ mm で反射損失が -36.4 dB と大きな電磁波吸収を示すこと、上記のフェライト粉を重量比 60~80 mass% で樹脂と複合化することにより、14~21 GHz と広い周波数帯域で $\text{R.L.} < -20$ dB とする広帯域特性が得られることがわかった。この広帯域特性は $(\text{Ti}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})^{3+}$ の置換量を変化させることにより、Fig. 6^{39)~41)} のように広帯域な特性を保ったまま中心周波数を変化させることができる。太田ら⁴²⁾は逆に $(\text{Ti}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})^{3+}$ 量を減少させた $\text{BaFe}_9(\text{Ti}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_2\text{O}_{19}$ 樹脂複合体が無線 LAN (加入者無線アクセスシステム (FWA)) (22~26 GHz) 用電磁波吸収体として有効であることを示している。また、最近、花澤ら⁴³⁾により 40 GHz 帯への応用、酒井ら⁴⁴⁾によっても 30 GHz 帯において 0.67 mm と薄型でかつ 6 GHz 以上にわたって -20 dB 以下の特性が得られることも報告されている。このような広帯域特性は、樹脂複合化した場合の透磁率の周波数分布が、インピーダンス整合となる透磁率の周波数分布と広帯域で一致ようになるためであり、このような周波数特性を示すところに M 型フェライトの優れた特徴がある⁴¹⁾。

さらに置換イオンを $(\text{Ti}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})^{3+}$ ではなく別のイオンで置換すれば、数 GHz~150 GHz で周波数帯域をシフトできる。低周波化では $(\text{Ti}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})^{3+}$ ではなく $(\text{Zr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})^{3+}$ が少ない置換量で効果があり、薄型化に有効である⁴⁵⁾。一方、高周波化では飯島と太田⁴⁶⁾が 60 GHz 帯の無線 LAN に対応させるため、異方性磁界の高い Al^{3+} 置換 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 系で電磁波吸収シートを作製し、Fig. 7⁴⁶⁾の結果を報告している。

また M 型フェライトは一軸磁気異方性を示すことから

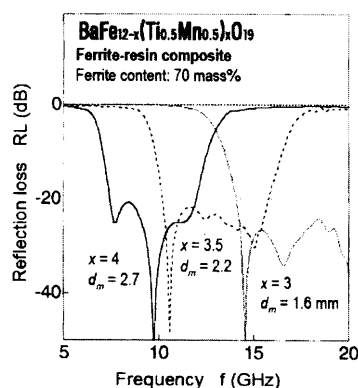


Fig. 6 Frequency dependence of the reflection loss of several M-type ferrite resin composites.^{39)~41)}

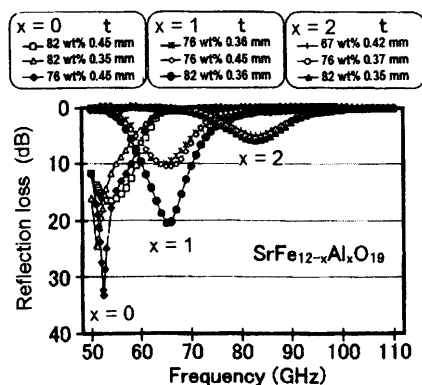


Fig. 7 Frequency dependence of $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$ ferrite resin composites.⁴⁶⁾

磁界配向が可能であり、これによって μ_r'' の増加および整合厚さの減少が可能である^{47), 48)}。その他、M型フェライトと類似の結晶構造を有したW型フェライト⁴⁹⁾も電磁波吸収特性を示し、M型フェライトとW型フェライトの混晶フェライト⁵⁰⁾においても優れた電磁波吸収特性が得られることも判明している。以上、M型(W型)フェライト化合物はマイクロ波帯からミリ波帯において優れた電磁波吸収特性を示すことから、今後期待される材料であるといえる。

(7) 希土類磁石化合物の利用

M型フェライトと同様GHz帯域で自然共鳴を示し、かつ飽和磁化の大きな金属系の材料の樹脂複合体は電磁波吸収体として有効であるといえる。この意味で希土類磁石化合物の代表である $\text{RE}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (RE: 希土類元素) 化合物は飽和磁化、異方性磁界も高く魅力的な材料である。本系化合物の共鳴周波数を変化させる方法としては $\text{Sm}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物が面内異方性を示すため、希土類元素の一部をSmで置換すれば異方性磁界が制御でき可能となる。筆者らは $(\text{Y}_{1-x}\text{Sm}_x)_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ^{51), 52)}, $(\text{Nd}_{1-x}\text{Sm}_x)_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ⁵³⁾化合物粉末の樹脂複合体を作製し、電磁波吸収特性を調べた。

Fig. 8⁵¹⁾は、 $(\text{RE}_{1-x}\text{Sm}_x)_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系における反射損失の周波数依存性を示したものである。吸収の中心周波数はSm置換量の増加に伴い、一軸磁気異方性を示す置換量では低周波側へ、さらに増加により面内異方性へ変化すると高周波側へシフトしていることがわかる。この電磁波吸収の得られる中心周波数は異方性磁界から計算された自然共鳴周波数に近く、 $x=0.15$ の試料では約15 GHzの吸収中心周波数となった。例えば無線LANの60 GHz帯域では無添加試料で、既述のFWAの周波数22 GHz近傍に着目すると、 $x=0.10$ の試料で吸収体厚さ0.69 mm, R.L. = -20.2 dBと十分な吸収が得られ対応が可能となる。また、これらの中心周波数を整合周波数 f_m とし、整合厚さ d_m との積である fd 積をM型フェライトと比較して示したのがFig. 9である。これより fd 積はM型フェライトより

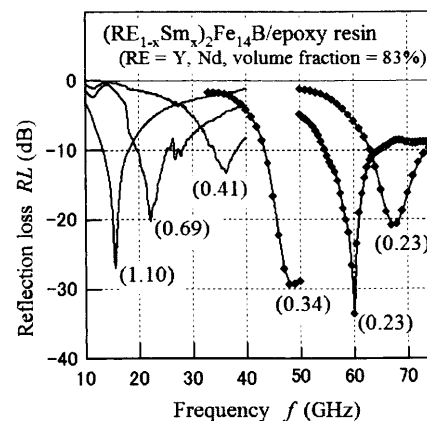


Fig. 8 Frequency dependence of the reflection loss of $(\text{RE}_{1-x}\text{Sm}_x)_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ resin composites.⁵¹⁾

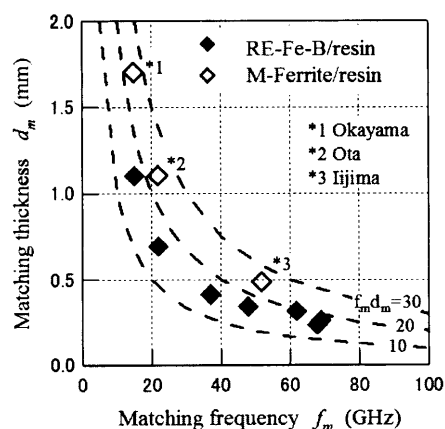


Fig. 9 Relationship between the matching thickness (d_m) and matching frequency (f_m) in $(\text{RE}_{1-x}\text{Sm}_x)_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ and M-type ferrite resin composites.⁵³⁾

30%低い値となっており、同じ周波数で比較した場合には30%薄型の吸収体となりうる。

一方、筆者ら^{54), 55)}は最近、周波数の制御の方法としてソフト磁性相とのナノコンポジット化を提案している。これは磁石化合物相とソフト磁性相間に交換結合を働かせることにより、実効的な異方性磁界を低減させることができるからである。この結果、Cu添加した $\text{Fe}_3\text{B}/\text{Y}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系樹脂複合体において吸収周波数を15 GHzシフトできること、交換結合の度合いを示すリコイル率と吸収周波数のシフト量に相関関係があることなどが判明している⁵⁵⁾。その他、微細なFe相と酸化物からなる樹脂複合体用粉末作製方法として希土類磁石化合物のガスとの不均化反応の利用^{56), 57)}なども提案しており、希土類磁石化合物には電磁波吸収体材料としての可能性があると考えられ、さらなる製造技術を含めた研究に期待したい。

4. 近傍界対応電磁波ノイズ抑制体

4.1 電磁波ノイズ抑制体の必要特性

携帯電話などの電子機器内部における高周波ノイズ対策の必要性が高まり、電磁波ノイズ抑制体が注目されている。放射ノイズ対策としては、電磁シールド材を電磁波発生源と障害を受けては困る部分の間に挿入し、電磁的に遮断するのが一般的であるが、電磁シールドが行えない場合には不要電磁波の漏洩が生じ、シールドを完全に行っても内部干渉の問題が発生する。またシールドケースおよび線路による共振現象、回路および線路の接合箇所のインピーダンス不整合による不要輻射なども生じる。このような問題を抑えるには、高周波損失の大きい電波吸収体を配置し、ノイズを低減するのが有効な手段とされている⁵⁸⁾。

このような電磁波ノイズ抑制体材料に必要な特性として吉田ら⁸⁾は、1) 電磁エネルギーを効率よく内部に導入するため、反射損失を抑えるよう高い電気抵抗があること、2) 進入した電磁エネルギーを効率よく吸収するため、希望する周波数域で μ_r'' が高くかつ適当な分散があることの2点を挙げている。以下、最近の電磁波ノイズ抑制体について記す。

4.2 軟磁性金属複合シート

前章で示したように軟磁性金属を扁平状にして樹脂複合化したシートが準マイクロ波帯で有効な材料として期待されている。軟磁性金属としては先に挙げたFe-Si-Al系^{8), 32)~34)}、ステンレス系³⁸⁾以外にもFe-Si系⁵⁹⁾、ナノ結晶軟磁性材料系⁶⁰⁾などがあり、実用化されている。Fe-Si-Al系の樹脂複合シート⁸⁾は、Fig. 5に示したような組織と μ_r'' が急峻に立ち上がって広帯域にわたり大きな値を保った後、緩やかに減少する透磁率の分散を示しており、ノイズ対策用材料として適した特性を有している。Fig. 10⁸⁾に吉田らが報告したFe-Si-Al樹脂複合シートの伝送損失 $P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ の周波数依存性を示した。 $P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ はマイクロストリップ線路上にシートを配置して測定された伝送特性 S_{11} および S_{21} (反射特性 S_{11} 、透過特性 S_{21})の変化から以下の式を用いて求めたもの⁸⁾で、高い値ほど抑制効果の高いことを示す。

$$P_{\text{loss}}/P_{\text{in}} = 1 - (|\Gamma|^2 + |T|^2) \quad (6)$$

$$\text{ここで } S_{11} = 20 \log |\Gamma|$$

$$S_{21} = 20 \log |T|$$

Γ は反射係数、 T は透過係数である。Fig. 10よりFe-Si-Al系樹脂複合シートは従来のゴムフェライトに比べ高い $P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ を示すことがわかる。

最近では小型電子機器内では熱対策の必要性から、熱伝導も優れたFe-Si-Al系樹脂複合化シートも市販されるようになってきた。また、その薄さもバリエーションが増え、 $25\mu\text{m}$ のものも量産化されてきている⁶¹⁾。一方、最近発表のナノ結晶材料系シートは0.1~10 GHzの広帯域で高い

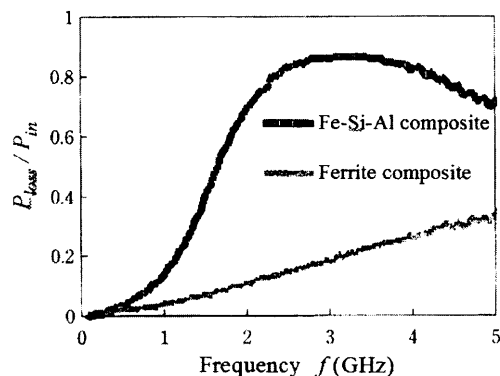


Fig. 10 Comparison of the power loss ($P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$) for the Fe-Si-Al composite sheet and a ferrite rubber sheet.⁸⁾

複素比透磁率を示す(1 GHzで $\mu_r''=10$)だけでなく、ハロゲンフリーの難燃性樹脂を使用しているため有害ガスが発生しないという特徴がある⁶⁰⁾。今後他社でも環境を配慮した複合シートが開発されていくと考えられる。

4.3 グラニューラー薄膜

高周波帯域で高電気抵抗と高透磁率を有するナノグラニューラー薄膜⁶²⁾は、伝導ノイズ抑制効果がある材料として最近注目されている。グラニューラー薄膜は軟磁性金属複合シートに比べて100倍近く高い透磁率を示すため、数マイクロの厚さで複合シートと同等の効果が期待される⁸⁾。しかしながらナノグラニューラー磁性薄膜は、フェライトなどに比べると電気抵抗が低く、スタブ効果により反射が起きてしまう。実用レベルでは、この反射を-10 dB以下に抑える必要があり、薄膜表面にスリットを入れパターン化する方法などが名倉ら^{63), 64)}によって提案されている。

Fig. 11⁶³⁾は名倉ら⁶³⁾によって報告されたFeCoAlO₂グ

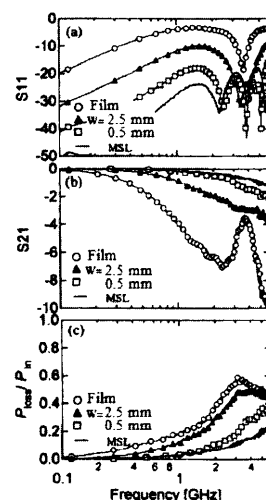


Fig. 11 Transmission characteristics of (a) the reflection parameter (S_{11}), (b) the transmission parameter (S_{21}), and (c) the power loss ($P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$) for FeCoAlO₂ nano-granular thin films.⁶³⁾

ラニューラー薄膜にマイクロストリップ線路と平行にスリットを入れた場合の伝送特性と伝送損失 $P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ である。これよりパターン化によって反射特性の S_{11} が下がり、かつその減少傾向もスリット幅の減少とともに大きくなることわかる。しかしスリット幅を小さくしすぎると、 $P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ も低下してしまい、最適サイズを選ぶ必要があると伺える。これらのパターン化ナノグラニューラー軟磁性膜（スリット幅 $W=0.25$ mm, 膜厚 $1\text{ }\mu\text{m}$ ）の $P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ を市販の樹脂複合磁性シート（膜厚 $=50\text{ }\mu\text{m}$ ）と比較すると、Fig. 12⁶³⁾ のようになる。これよりパターン化ナノグラニューラー薄膜は厚さ $1/50$ で 2 GHz 帯域ではほぼ同じ伝送損失特性、 3 GHz での $\Delta P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$ は複合磁性シートの 1.4 倍と優れた特性を示すことがわかる。

4.4 フェライトめっき膜

水溶液プロセスであるスピンスプレー・フェライトめっき法で作製される NiZn フェライト薄膜も有効な GHz 帯の電磁波ノイズ抑制体として報告されている^{65)~69)}。従来の NiZn フェライトのバルク材料では上述したように

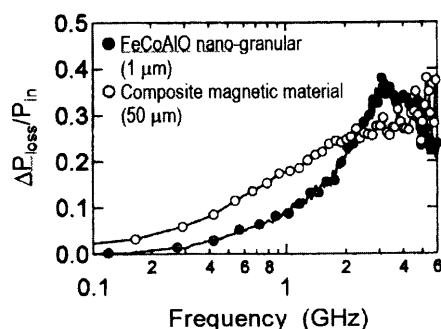


Fig. 12 Comparison of the power loss ($P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$) for the FeCoAlO nano-granular thin film and a composite magnetic material sheet.⁶³⁾

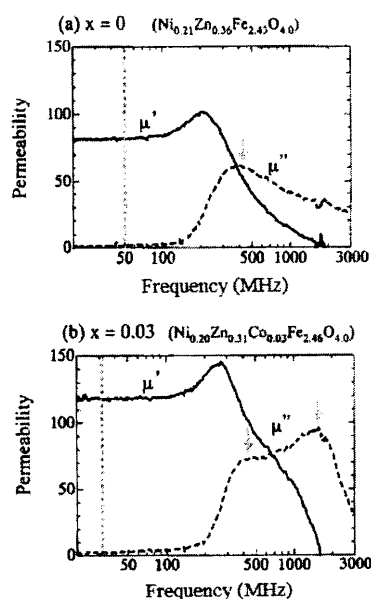


Fig. 13 Frequency profiles of the complex permeability for a NiZnCo ferrite film.^{68), 8)}

Snoek の限界によって、高周波域において透磁率が低下してしまう。これに対して薄膜材料では、磁化を面内方向に向けようとする反磁界が異方性磁界に付加されるため、自然共鳴周波数は次式のように高周波側へ移動する。

$$f_r = \gamma / (2\pi) \sqrt{I_s H_A / \mu_0} \quad (7)$$

阿部、松下ら⁶⁶⁾はこれらの原理を NiZn フェライトめっき膜へ応用し、準マイクロ波帯で機能する電磁波抑制体に発展させている。なおフェライトめっきの原理に関しては本誌において開発者である阿部の解説⁷⁰⁾があるのでそちらを参照していただきたい。

フェライトめっき法ではめっき条件を変えることによって高周波特性を変化させることができる。また Co の微量添加により Fe^{2+} と Co^{2+} の磁気異方性が相殺され、透磁率が向上する。Fig. 13 に阿部らが報告した⁶⁵⁾ Co 添加 NiZn フェライト膜の透磁率の周波数依存性を示す。これより $\mu_r' = 120$ 、共鳴周波数 $f_r = 900\text{ MHz}$ 、 μ_r'' の値も GHz 域に入っても数十以上を示し、電磁波ノイズ抑制体として良好の特性を有していることがわかる。また最近同グループの Matsushita ら⁶⁹⁾により磁界印加した成膜により、誘導磁気異方性も付加できることも紹介されている。

阿部ら⁶⁵⁾はマイクロストリップ線路上に直接めっきした厚さ $3\text{ }\mu\text{m}$ の NiZn フェライトめっき膜において、反射損失 10% (-12 dB) 以下で 5 GHz まで 70% (-6.9 dB) の磁気損失を得ており、電磁波ノイズ抑制体として実用化できることを示している。フェライトめっきの最大の特徴は、真空を必要とせず、かつ低温で高特性の薄膜を成膜できる点にあり、今後さらに発展すると期待されている。

5. あとがき

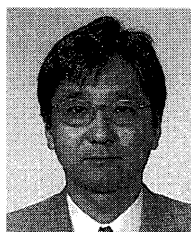
電磁波障害を防止する技術として電磁波吸収体および電磁波ノイズ抑制体について述べてきた。いずれも希望する周波数帯域で最適な材料を選択し、より薄く、より効率良く電磁波を吸収しようとするものにはほかならない。この分野のさらなる発展のためには多くの材料における応用検討、新材料開発などが不可欠であり、今後ますます電気・電子・通信技術者と材料開発者との協力が必要となると信じている。

参考文献

- 1) 橋本 修: 日本応用磁気学会誌, **26**, 1143 (2002).
- 2) 橋本 修: “電波吸収体のはなし” (日刊工業新聞社, 2001).
- 3) 橋本 修: “電波吸収体入門” (森北出版, 1997).
- 4) 橋本 修監修: “新電波吸収体の最新技術と応用” (シーエムシー, 1999).
- 5) 内藤喜之: “電波吸収体” (オーム社, 1987).
- 6) 長谷川 伸ほか: “電磁波障害” (産業図書, 1991).
- 7) 清水康敬, 杉浦 行 (編著): “電磁妨害波の基本と対策” (電子情報通信学会, 1995).
- 8) 吉田栄吉ほか: まてりあ, **42**, 193 (2003).
- 9) 橋本 修ほか: 工業材料, **46**, 45 (1998).

- 10) 橋本 修ほか: 信学技報, EMCJ2001-18, 53 (2001. 5).
- 11) 伊藤晶彦ほか: 信学技報, EMCJ2001-19, 1 (2001. 6).
- 12) 伊藤晶彦, 橋本 修: 信学技法, EMCJ2002-28, 67 (2002. 6).
- 13) Y. Naito and K. Suetake: *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **19**, 65 (1971).
- 14) 内藤喜之, 藤原英二: 電子情報通信学会論文誌 B, **53B**, 537 (1970).
- 15) D. Y. Kim *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-32**, 555 (1996).
- 16) B. T. Lee and H. C. Kim: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, 3401 (1996).
- 17) S. B. Cho, D. H. Kang, and J. H. Oh: *J. Mater. Sci.*, **31**, 4719 (1996).
- 18) D. H. Kang *et al.*: The Sixth International Conference on Ferrites (ICF6), Tokyo and Kyoto, p. 1335 (1992).
- 19) 太田恵造: “磁気工学の基礎” (共立出版, 東京, 1973).
- 20) 平賀貞太郎: “電子材料シリーズ フェライト” (丸善, 東京, 1986).
- 21) H. J. Kwon *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **75**, 6109 (1994).
- 22) J. Y. Shin and J. H. Oh: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-29**, 3437 (1993).
- 23) 小田喜一, 乾 哲司: 粉体および粉末冶金, **46**, 88 (1999).
- 24) M. Matsumoto and Y. Miyata: *J. Appl. Phys.*, **79**, 5486 (1996).
- 25) 小塚洋司ほか: 信学技報, EMCJ2001-54, MW2001-72, 13 (2001. 10).
- 26) 小塚洋司ほか: 信学技報, EMCJ2002-67, MW2002-97, 19 (2002. 10).
- 27) 天野充博, 小塚洋司: 信学技報, EMCJ2001-70, MW2001-70, 1 (2001. 10).
- 28) 天野充博, 小塚洋司: 信学技報, EMCJ2002-23, 41 (2002. 6).
- 29) 長野利昭ほか: 信学技報, EMCJ2002-64, NW2002-94, 1 (2002. 10).
- 30) 関西ペイント HP: <http://www.kansai.co.jp/news03/jan/>
- 31) 長野利昭ほか: 2003 年電子情報通信学会総合大会概要, B-4-27, 394 (2003).
- 32) 吉田栄吉: 日本応用磁気学会誌, **22**, 1353 (1998).
- 33) 吉田栄吉ほか: 日本応用磁気学会誌, **22**, 1377 (1998).
- 34) 吉田栄吉: 工業材料, **46**, 31 (1998).
- 35) 内藤喜之ほか: 電子情報通信学会論文誌 B, **54B**, 16 (1971).
- 36) 松本守彦, 宮田恵守: 日本応用磁気学会誌, **22**, 85 (1998).
- 37) 藤枝 正ほか: 第 129 回日本金属学会講演概要集, p. 386 (2001).
- 38) 齊藤章彦ほか: 工業材料, **46**, 54 (1998).
- 39) S. Sugimoto *et al.*: *Mater. Trans.*, *JIM*, **39**, 1080 (1998).
- 40) S. Sugimoto *et al.*: *J. Magn. Soc. Japan*, **23**, 611 (1999).
- 41) S. Sugimoto *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-35**, 25 (1999).
- 42) 太田博康ほか: 2000 年電子情報通信学会ソサエティ大会講演論文集, B-7-9 (2000).
- 43) 花澤理宏ほか: 電子情報通信学会ソサエティ大会, B4-24 (2001).
- 44) 酒井泰二ほか: 2003 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-4-20, 387 (2003).
- 45) S. Sugimoto *et al.*: Ferrites: Proc. 8th Int. Conf. on Ferrites (ICF 8), Kyoto and Tokyo, Japan, p. 979 (The Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 2000).
- 46) 飯島 康, 太田博康: EMC Lab. ワークショップ第 6 回予稿集, 平成 11 年 7 月 2 日, (株)環境電磁技術研究所, 16 pp (1999).
- 47) H. Takabayashi *et al.*: *Mater. Trans.*, *JIM*, **41**, 1184 (2000).
- 48) H. Takabayashi *et al.*: Ferrites: Proc. Int. Conf. on Ferrites (ICF 8), Kyoto and Tokyo, Japan, p. 985 (The Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 2000).
- 49) 前田與志亮ほか: 日本応用磁気学会誌, **24**, 895 (2000).
- 50) Y. Maeda *et al.*: *Mater. Trans.*, *JIM*, **41**, 567 (2000).
- 51) 前田 徹ほか: 粉体および粉末冶金, **50**(1), 63 (2003).
- 52) T. Maeda *et al.*: Proc. 17th Int'l Workshop on Rare Earth Magnets and Their Applications, August 18-22, 2002, Newark, Delaware, USA, p. 592 (2002).
- 53) 前田 徹ほか: 2003 年電子情報通信学会総合大会, B-4-18, 385 (2003).
- 54) 前田 徹ほか: 日本金属学会秋季大会講演概要, p. 571 (2002).
- 55) 前田 徹ほか: 日本金属学会秋季大会講演概要, p. 195 (2003).
- 56) S. Sugimoto *et al.*: *J. Alloys and Compounds*, **330-332**, 301 (2002).
- 57) T. Maeda *et al.*: *Mater. Trans.*, *JIM*, **42**, 446 (2001).
- 58) 橋本康雄: まてりあ, **42**, 182 (2003).
- 59) 橋本康雄, 栗原 弘: 工業材料, **46**, 36 (1998).
- 60) 日立金属カタログ「アブソシールド®」K-E シリーズ (2003), 日立金属ホームページ: <http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod02/pdf/hl-fm13.pdf>
- 61) NEC-Tokin カタログ「バスタレイド」「フィルムインピーダ」, NEC-Tokin ホームページ: http://www.nec-tokin.net/now/product/pdf_dl/BUSTERAID.pdf
- 62) 大沼繁弘 ほか: 日本応用磁気学会誌, **22**, 441 (1998).
- 63) 名倉秀明 ほか: 電気学会研究会資料, マグネティックス研究会, **MAG-03-13**, 65 (2003).
- 64) 名倉秀明 ほか: 日本金属学会春期大会講演概要, p. 195 (2003).
- 65) 阿部正紀: まてりあ, **42**, 198 (2003).
- 66) 松下信広 ほか: 日本応用磁気学会誌, **26**, 475 (2002).
- 67) N. Matsushita *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **91**, 7376 (2002).
- 68) N. Matsushita *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-38**, 3154 (2002).
- 69) N. Matsushita *et al.*: Intermag 2003, HC-02 (2003).
- 70) 阿部正紀: 日本応用磁気学会誌, **22**, 1225 (1998).

(2003 年 5 月 2 日受理)



杉本 諭 すぎもと さとし

昭 59 東北大学大学院工学研究科金属材料工学専攻修士課程修了, 同大工学部助手, 平 4 同助教授, 平 9 同大学院工学研究科助教授, 現在に至る。

専門 磁性材料 (工博)