リサイクルポリエステル繊維製多孔質体を基材とした複合電波吸収材料

Electromagnetic Wave Absorber Using a Porous Board Made of Recycled Polyester Fibers

河井治信・近藤祥人

香川県産業技術センター, 香川県高松市郷東町 587-1 (〒761-8031)

H. Kawai and Y. Kondo

Kagawa Prefectural Industrial Technology Center, 587-1 Goto-cho, Takamatsu, Kagawa, 761-8031

Recently, PET bottles have been widely used because of their convenient lightness. Recycling of discarded PET bottles is therefore desirable. Raw materials such as fiber and resin can be regenerated from them. Electromagnetic wave absorbers were produced using a porous board made of polyester fibers recycled from PET bottles. Its loss factor was a composite of carbon and various ferrites such as Mn-Zn ferrite, Ni-Cu-Zn ferrite, and magnetite. The bulk specific gravity of these absorbers is very low (less than 1.2). These absorption characteristics are practical for Blue Tooth and ETC frequencies (2.45 GHz and 5.8 GHz, respectively).

Key words: electromagnetic wave absorber, Mn-Zn ferrite, Ni-Cu-Zn ferrite, magnetite, carbon, polyester fiber, porous board, recycled material

1. はじめに

ペットボトル容器は、軽量性などにより、缶に替わる容器として、近年爆発的に普及してきた。これに伴い、廃棄容器のリサイクル化が積極的に行われており、繊維や樹脂などの素材に再生され、資源の有効利用が図られている。資源循環型社会の到来にともない、このような廃棄物の再処理技術に大きな関心が寄せられている^{1)~3)}。

また、近年の情報通信技術の高度化に伴い、テレビ放送や携帯電話にはじまり、Blue Tooth や ETC (自動料金収受システム) などの新規システムに至るまで、幅広い分野で電波が利用されている。このような電波利用形態の多様化にともない、高層ビルの壁面でテレビ放送波が反射することで生じるゴースト現象や、電子機器から発生する電波の影響で他の周辺機器が誤作動を起こす電磁波障害が社会問題になっている。この電磁波障害の解決法として、電波吸収材料を用いて、不要な電波を吸収し、電波の反射および侵入を防ぐ方法が有効である。そこで、多様な電波に対応できる電波吸収材料の開発が盛んに行われている^{1)~8)}。

スピネル型ソフトフェライトを用いた電波吸収材料は、おもに 1 GHz 以下の周波数帯域で極めて良好な特性を有する。しかし、フェライトは比重が約 5 程度であり、焼結フェライト電波吸収材料は高重量になる。また、現在、電波吸収材料の適用が必要とされている Blue Tooth や ETC などの 1 GHz を超える高周波帯域への適用が難しい。このため、スピネル型ソフトフェライトと誘電材料を複合させ、1 GHz を超える高周波帯域に吸収特性を有する複合電波吸収体の開発が行われている^{6), 7)}。本研究では、電波吸収材料の軽量化、および高周波帯域化を目的に、ポリエステル繊維製の多孔質体を電波吸収材料の基材に用い、この多

孔質体に、損失媒体としてスピネル型ソフトフェライトとカーボンを含浸させた電波吸収材料を創製し、この電波吸収特性の評価を行った。また同時に、資源の有効利用を目的に、この電波吸収材料の基材であるポリエステル繊維製多孔質体は、回収されたペットボトル容器を再処理して生成されたポリエステル繊維により製造した。

2. 試料の作製

2.1 リサイクルポリエステル繊維製ボード

廃棄ペットボトルから生成した太さ 20 デニール[†]のリサイクルポリエステル繊維 70 mass% に対して、低融点繊維を絡めた太さ 4 デニールのポリエステル繊維 30 mass% を配合し、混合した後、ほぐし工程、すき工程を経て、積層成形することにより、かさ比重が約 0.03、厚さ約 30 mm のポリエステル繊維製不織布を作製した。この不織布を温度 180 °C、圧力 10 MPa で 1 分間熱間プレスした後、温度 28 °C、圧力 10 MPa で、熱間プレスと同時間冷間プレスすることにより不織布に比較して高剛性のポリエステル繊維製ボードとした。なお、熱間および冷間プレス成形時の上下加圧面間に任意厚の金属製スペーサーを設置し、プレス時の加圧面間隔を調整することにより、作製するポリエステル繊維製ボードの厚みを任意に制御可能である。本研究では、上下加圧面間の下パンチ上面周辺部に厚さ 3 mm のスペーサー (鉄板) を設置したことから、試作したポリエステル繊維製ボードの厚みは約 3 mm となり、かさ比重は 0.31 となった⁹⁾。

Fig. 1 に、ポリエステル繊維製ボードの表面の SEM 写真を、Fig. 2 にボード厚み方向における中央部の SEM 写真を示す。ポリエステル繊維により構成される気孔が多量に認められ、本ボードが多孔質材料であり、それに起因してかさ比重が小さい値であることがわかる。ボード表面近傍において、ポリエステル繊維の接着部は融着しているものの、ボード厚み方向の中央部においては、ポリエステル繊維接触部に融着現象は確認できない。ポリエステル繊維は 130 °C 以上の温度で熔融することから、熱間プレス工程で不織布が圧縮されるとともに、繊維接触部で融着し、冷間プレス工程で固化されたものと考えられる。したがって、不織布の圧縮比、熱間プレスの温度および時間を調整することにより、ボードのかさ比重や剛性を調整することが可能である。

[†] デニールは繊維の太さを示す単位。長さ 9000 m 当りの質量が 1 g である繊維の太さが 1 デニール。20 デニールは、9000 m 当りの質量が 20 g である繊維の太さを示す。

Fig. 1 SEM photograph of the surface of a board manufactured from polyester fibers.

Fig. 2 SEM photograph of the central part in the direction of the thickness of the board.

2.2 電波吸収ボードの試作

スピネル型ソフトフェライト粉末としては、Mn-Zn フェライト(戸田工業(株)製 BSF-547, 平均粒子径 3.4 μm), Ni-Cu-Zn フェライト(戸田工業(株)製 GNC-2, 平均粒子径 3.4 μm) およびマグネタイト(チタン工業(株)製 BL-100, 平均粒子径 0.4 μm) を、カーボン粉末としては、カーボンブラック(CANCARB Ltd.製 N991, 平均粒子径 0.2 μm) を使用した。これらの原料粉末は市販のものであり、詳細な製造工程は不明であるが、フェライトについては固相反応させた後、粗粉碎および微粉碎工程を経て製品とされている。フェライト粉末の配合割合が 58~84 mass%, カーボン粉末の配合割合が 16~42 mass% である。含量 100 mass% の混合粉末 100 g に対して、ポリビニルアルコール 15 g を加え、水を溶媒として使用し、混合粉末の固形分濃度が 20 vol% のスラリーを調製した。ここで、フェライト粉末およびカーボン粉末の配合割合は、2 mass% ごとに变化させている。これらスラリー中に約 50×50×3 mm の上記ボードを入れ、減圧下に 45 分置くことにより、スラリーをボードに含浸させた後、70 $^{\circ}\text{C}$ で乾燥させることにより電波吸収ボードとした。これら供試体のかさ比重を測定するとともに、フェライトとカーボンの混合粉末を含浸させた後のボードの微構造を SEM 観察した。

2.3 電波吸収特性の測定方法

作製した電波吸収ボードの電波吸収性能は、Fig. 3 に示す同軸線路を用いた S パラメータ法¹⁰⁾ により評価した。S パラメータ法による測定方法について示す。外径 7.00 mm、内径 3.04 mm のトロイダルコア形状に加工した試料を、Fig. 3 に示すように、特性インピーダンス 50 Ω の同軸管内に隙間が無いように配置し、この同軸管をベクトルネット

Network analyzer: Hewlett Packard 8720D
Coaxial line: 7D (outer diameter 7.00 mm, inner diameter 3.04 mm)

Fig. 3 Block diagram of the measurement system using the S parameter method.

ワークアナライザの Port 1 と Port 2 の間に挿入する。ベクトルネットワークアナライザで試料の反射係数 S_{11} と透過係数 S_{21} の振幅と位相を測定し、これらから Nicolson-Ross, Weir 法によるモデルを用いて試料の複素誘電率と複素透磁率を算出した。さらに、試料の端面を完全反射体である金属反射板で裏打ちして、電波吸収性能である反射減衰量を測定した。高周波帯域の測定においては、試料の変形などに起因する誤差発生要因が非常に多い。このため、測定された複素誘電率と複素透磁率の妥当性は、得られた複素誘電率と複素透磁率の測定値から試料と同じ厚さに対する反射減衰量を計算し、測定された反射減衰量との比較を行うことで確認した。

3 実験結果と考察

3.1 試作した電波吸収ボードのかさ比重と微構造

フェライトとカーボンの混合粉末を含浸させたポリエステル繊維製ボードのかさ比重を Fig. 4 に示す。カーボン粉末の配合割合が多くなるとともにボードのかさ比重は小さくなっている。これはフェライト粉末に比較して比重の小さいカーボン粉末の配合割合が高くなることによるものである。また、マグネタイトを使用したボードのかさ比重が、他の二種類のフェライトを使用した場合に比べて小さい値を示しているが、マグネタイトの比重が他の二種類のフェライトと比較して小さいことに起因している。いずれにしても、フェライトの比重が約 5 であることを考えると、試作した電磁波吸収ボードの比重はかなり小さいといえる。

Fig. 4 Bulk specific gravity of electromagnetic wave absorber boards.

Fig. 5 SEM photograph of the microstructure of an electromagnetic wave absorber board.

含浸させたスラリーの固形分濃度が 20 vol%であることから、ポリエステル繊維製ボードの空隙部の 20 vol%がフェライトとカーボンの混合粉末により充填されたものと考えられる。ボード単体のかさ比重が 0.31 であり、ポリエステル繊維製ボードの空隙率は約 70 vol%であると考えられることから、試作した電波吸収材料の空隙率は約 50 vol%であると推察される。

Fig. 5 に試作した電波吸収ボードの微構造についての SEM 写真を示す。フェライトとカーボンの混合粉末がポリエステル繊維の表面に被覆されるとともに、ポリエステル繊維により構成される気孔を一部充填しているが、未だ多くの空隙が確認できる。

3.2 電波吸収ボードの電波吸収特性の測定結果

試作した電波吸収ボードの複素誘電率と複素透磁率を S パラメータ法により測定した。測定周波数帯域は 0.5~10 GHz とした。

Fig. 6 に Mn-Zn フェライトとカーボンの複合系, Fig. 7 に Ni-Cu-Zn フェライトとカーボンの複合系, Fig. 8 にマグネタイトとカーボンの複合系の、複素誘電率（実部 ϵ' 、虚部 ϵ'' ）と複素透磁率（実部 μ' 、虚部 μ'' ）の周波数分散特性を示す。試料切出し部位などに起因する特性のばらつきがみられるが、カーボンの配合割合が高くなるに従って ϵ' 、 ϵ'' とも増加し、 μ' 、 μ'' ともに減少している。カーボン配合割合の増加による ϵ' 、 ϵ'' の増加傾向は大きく、これに比べて μ' 、 μ'' の減少傾向は非常に小さい。また、周波数に対する分散特性は、周波数が高くなるに従い ϵ' 、 ϵ'' ともに単調に減少する。 μ' は周波数が高くなるに従い単調に減少するが、 μ'' は極大点を取り、これより低周波側では増加し高周波側では減少する。この極大点をとる周波数はカーボンの配合割合に関わらずほぼ同じであり、Mn-Zn フェライトとカーボンの複合系では 1.5~2.0 GHz、Ni-Cu-Zn フェライトとカーボンの複合系では 1.0~1.5 GHz、マグネタイトとカーボンの複合系では 3.0~4.0 GHz 付近である。この極大点をとる周波数が試料により異なる現象は、用いているフェライトの種類により試料の共鳴周波数が異なることが原因と考えられる。共鳴周波数はフェライトの種類により異なるとともに、フェライトの粒子径が小さいほど高周波側に移行する¹¹⁾。従って、Mn-Zn フェライト複合系の共鳴周波数が Ni-Cu-Zn フェライト複合系の共鳴周波数より高いのは、Mn-Zn フェライトの共鳴周波数が同粒子径の Ni-Cu-Zn フェライトの共鳴周波数より高いためであり、マグネタイト複合系の共鳴周波数が他のフェライト複

Fig. 6 Frequency dependence of the complex permittivity and permeability of an Mn-Zn ferrite-carbon composite.

Fig. 7 Frequency dependence of the complex permittivity and permeability of an Ni-Cu-Zn ferrite-carbon composite.

Fig. 8 Frequency dependence of the complex permittivity and permeability of a magnetite-carbon composite.

合系に比べて高いのは、マグネタイトの平均粒子径が他の二種類のフェライトより小さいためであると考えられる。

つぎに、特定周波数においてカーボンの配合割合に対する複素誘電率、複素透磁率の変化特性を検討した。最近注目を浴びている Blue Tooth 周波数帯域の 2.45 GHz と、ETC 周波数帯域の 5.8 GHz について、カーボンの配合割合に対する複素誘電率、複素透磁率の変化特性をそれぞれ Fig. 9, Fig. 10 に示す。電波吸収特性測定用の試料は、外径 7.00 mm と非常に小さいため、試料切出し部位による特性のばらつき、および試料の加工精度による測定値のばらつきが避けられない。そこで、最小二乗法により複素誘電率、複素透磁率の実験値を求めた。この実験値を Fig. 9, Fig. 10 に直線で示す。

カーボンの配合割合が高くなるに従って複素誘電率(ϵ' , ϵ'')ともに増加し、複素透磁率(μ' , μ'')ともに減少する。2.45 GHz 帯域のほうが 5.8 GHz 帯域に比べて ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' ともに大きな値をとるが、変化特性はほぼ同じ傾向を示している。ただ、5.8 GHz 帯域における μ' の変化は極めて小さく、ほとんど変化しないといえる。各複合系における特徴をみると、Mn-Zn フェライトとカーボンの複合系では、 ϵ' , μ' , μ'' が高い。Ni-Cu-Zn フェライトとカーボンの複合系では、 ϵ'' が高く、 μ' , μ'' が低い。また、カーボンの配合割合を高めることによる ϵ' , ϵ'' の増加率が大きい。マグネタイトとカーボンの複合系では、 ϵ'' が低く、 μ' , μ'' が高い。このような複素誘電率(ϵ' , ϵ'')、複素透磁率(μ' , μ'')の、カーボンの配合割合に対する変化特性は、用いているフェライト単体の有する複素誘電率(ϵ' , ϵ'')、複素透磁率(μ' , μ'')の値を反映し

Fig. 9 Relationship of the complex permittivity and permeability to the mixing ratio of carbon for samples at a frequency of 2.45 GHz.

Fig. 10 Relationship of the complex permittivity and permeability to the mixing ratio of carbon for samples at a frequency of 5.8 GHz.

ていると考えられる。Ni-Cu-Zn フェライト複合系における、カーボンの配合割合を高めることによる ϵ' 、 ϵ'' の増加率が、他の二種類の複合系に比べて大きい。このことにより、Ni-Cu-Zn フェライト単体の ϵ' 、 ϵ'' は他の二種類のフェライトに比べてかなり低く、カーボンの配合割合が高くなると ϵ' 、 ϵ'' が飽和してきて、線形最小二乗法による解析では ϵ' 、 ϵ'' の増加率が大きくなるものと考えられる。Mn-Zn フェライトおよびマグネタイト複合系における ϵ' 、 ϵ'' の増加率、および全てのフェライト複合系における μ' 、 μ'' の減少率はほぼ同じである。したがって、Mn-Zn フェライト単体は、マグネタイト単体より ϵ' 、 ϵ'' 、 μ' 、 μ'' ともに高く、Ni-Cu-Zn フェライト単体の μ' 、 μ'' は、他の二種類のフェライトより低いと考えられる。このような試料による特性の異なりは、4章に示す電波吸収材料の、整合時の厚みなどの特性に大きく影響を及ぼす。

4. 電波吸収材料の設計

4.1 電波吸収材料の電波吸収特性

端面を反射板で裏打ちした単層型電波吸収材料の、電波吸収性能である反射減衰量の算出法について示す^{12), 13)}。

電波吸収体の厚さを d 、特性インピーダンスを $\dot{Z}_c$ 、伝搬定数を $\dot{\gamma}$ とする。試料の表面から反射板を見込んだ入力インピーダンス $\dot{Z}_{in}$ は、試料の複素誘電率 $\dot{\epsilon}(\epsilon' - j\epsilon'')$ 、複素透磁率 $\dot{\mu}(\mu' - j\mu'')$ 、および電波インピーダンス $Z_0(=120\pi)$ から分布定数回路理論により次式で表される。

$$\dot{Z}_{in} = \dot{Z}_c \cdot \tanh(\dot{\gamma} \cdot d) \quad (1)$$

$$\dot{Z}_c = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{\dot{\mu}}{\dot{\epsilon}}} \quad \dot{\gamma} = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon} \cdot \dot{\mu}}$$

試料表面での電波の反射係数 $\dot{\Gamma}$ は、 $\dot{Z}_{in}$ と Z_0 により次式で表される。

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{Z}_{in} - Z_0}{\dot{Z}_{in} + Z_0} \quad (2)$$

さらに、試料の反射減衰量 RL は反射係数 $\dot{\Gamma}$ から、次式で求められる。

$$RL = -20 \log_{10} |\dot{\Gamma}| \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

電波吸収材料の設計は、目的とする吸収周波数帯域に整合するように、試料の厚さとカーボンの配合量を決定することである。電波吸収材料を実現するには、目的の周波数で反射係数 $\dot{\Gamma}$ が0になるようにすればよい。このための条件式は、電波吸収材料の厚さ d とカーボンの配合割合 G を変数として次式で表される。

$$\dot{\Gamma}(d, G) = 0 - j0 \quad (4)$$

しかし、反射係数 $\dot{\Gamma}$ が0になるのは電波の完全吸収の場合であり、一般にはこの条件を満たすのは難しい。そこで、反射係数を最小にするカーボンの配合割合とそのときの整合厚さを求めることになる。

4.2 2.45 GHz および 5.8 GHz 用電波吸収ボード

試作した電波吸収ボードについて、Blue Tooth 周波数 2.45 GHz 帯域と、ETC 周波数 5.8 GHz 帯域の電波を吸収する電波吸収材料の設計を行った。2.45 GHz 帯域は、Blue Tooth のほか、無線 LAN や電子レンジなどで用いられている周波数帯域であり、パーティションなどの用途で電波吸収材料の必要性が高い帯域である。また、5.8 GHz 帯域は、ETC を含めた DSRC (狭域通信) で用いられている周

波数帯域である。ETC の運用には、誤動作防止のための電波吸収材料の敷設が不可欠とされており、5.8 GHz 帯域電波吸収材料は、今後需要の拡大が見込まれている。

各フェライトとカーボンの複合系電波吸収ボードについて、カーボンの配合割合ごとに、2.45 GHz 帯域および 5.8 GHz 帯域で反射減衰量が最大になるための試料の厚さと、このときの反射減衰量を(1)~(3)式により計算した。この関係を Fig. 11 および Fig. 12 に示す。計算に用いた試料の複素誘電率(ϵ' 、 ϵ'')と複素透磁率(μ' 、 μ'')は、Fig. 9, Fig. 10

Fig. 11 Relationship between maximum reflection loss and thickness for samples at a frequency of 2.45 GHz.

Fig. 12 Relationship between maximum reflection loss and thickness for samples at a frequency of 5.8 GHz.

Table 1 Matching thickness and reflection loss for samples at 2.45 GHz and 5.8 GHz.

2.45 GHz	Mixing rate (mass%)	Reflection loss (dB)	Thickness (mm)
Mn-Zn	24.0	55.35	10.16
Ni-Cu-Zn	22.0	57.90	11.94
Magnetite	32.0	49.05	9.98
5.8 GHz	Mixing rate (mass%)	Reflection loss (dB)	Thickness (mm)
Mn-Zn	24.0	44.63	5.08
Ni-Cu-Zn	28.0	46.97	5.44
Magnetite	36.0	53.38	4.81

Fig. 13 Frequency dependence of the reflection loss for samples matched at 2.45 GHz.

Fig. 14 Frequency dependence of the reflection loss for samples matched at 5.8 GHz.

に示す実験値を用いている。これらから、各フェライトとカーボンの複合系電波吸収ボードの、2.45 GHz 帯域および 5.8 GHz 帯域で整合を得るためのカーボン配合割合と、そのときの反射減衰量および整合厚さを Table 1 に示す。

カーボンの配合割合が高くなるに従い、反射減衰量が最大になるための試料の厚みは薄くなる。5.8 GHz 帯域は 2.45 GHz 帯域に比べ、 ϵ' 、 ϵ'' が低くなるため、整合を得るために必要なカーボン配合割合が高くなっている。Mn-Zn フェライトとカーボンの複合系、および Ni-Cu-Zn フェライトとカーボンの複合系は、複素誘電率 ϵ' 、 ϵ'' が高いため、少ないカーボン配合割合で整合している。このとき、Mn-Zn フェライトとカーボンの複合系は μ'' が高いため薄い整合厚に、Ni-Cu-Zn フェライトとカーボンの複合系は μ'' が低いから厚い整合厚になっている。一方、マグネタイトとカーボンの複合系は、 ϵ'' が低いから、これを補うために高いカーボン配合割合を必要としている。このため、逆に最も薄い整合厚になっている。

各フェライトとカーボンの複合系について、先に設計した Table 1 に示す配合割合の試料について、複素誘電率 (ϵ' 、 ϵ'') と複素透磁率 (μ' 、 μ'') の測定値から反射減衰量の周波数特性を (1)~(3) 式により計算した。 ϵ' 、 ϵ'' 、 μ' 、 μ'' の測定値にはばらつきがあり、実験値と完全には一致しない。このため、2.45 GHz および 5.8 GHz で反射減衰量が最大になるように試料の厚みを調整し、周波数特性を求めた。この結果を Fig. 13 と Fig. 14 に示す。いずれの場合でも、20 dB 以上の実用上十分な反射減衰量が得られている。

試作した電波吸収ボードは、廃棄物リサイクル素材を用いた環境面に配慮した電波吸収材料である。このため、バインダーには、水に溶解が可能なポリビニルアルコールを用い、廃棄処理の際には煮沸することによりフェライト等の無機粉末とポリエステル繊維との分離を可能にしている。ただ、工業化に際しては、雨水の浸入による溶解などを避けるために、アクリルエマルジョンなどのバインダーの使用が必要であり、技術的には容易に対応可能である。

5. まとめ

ペットボトル容器から再生されたポリエステル繊維で製造した多孔質体に、各種のスピネル型ソフトフェライトとカーボンを含浸させて、電波吸収材料を作製した。特性評価の結果、次の結果を得た。

- (1) かさ比重が約 1.0~1.2 であり、フェライト単体の 5 に比して極めて軽量の電波吸収材料である。
- (2) 2.45 GHz および 5.8 GHz に整合時の吸収特性は、いずれの場合でも 20 dB 以上であり、実用上十分といえる。
- (3) Mn-Zn フェライトとカーボンの複合系は、整合時のカーボン配合割合が低く、整合厚は薄い。Ni-Cu-Zn フェライトとカーボンの複合系は、整合時のカーボン配合割合が低く、整合厚は厚い。マグネタイトとカーボンの複合系は、整合時のカーボン配合割合が高く、整合厚は薄い。
- (4) 整合周波数が高くなるに従い、カーボン配合割合が高くなる。また、整合時のカーボン配合割合が高くなるに従い、整合厚が薄くなり、これに起因してかさ比重が小さくなる。
- (5) 廃棄物リサイクル素材を用いた環境面に配慮した電波吸収材料である。

軽量でかつ安価なマグネタイトと、カーボンを含浸させた場合でも、実用上十分な電波吸収性能が得られることがわかった。このため含浸させるマグネタイトとカーボンの量を制御することで、さらに軽量でかつ安価な電波吸収材料が得られると期待される。

参考文献

- 1) H. Kawai, Y. Nishimura and H. Takagi: J. Magn. Soc. Jpn., 26, 147 (2002).
- 2) Y. Matsuo: J. Magn. Soc. Jpn., 25, 1565 (2001).
- 3) Y. Matsuo, T. Hashimoto, F. Nakao and T. Watanabe: Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 49, 100 (2002).
- 4) Y. Hashimoto: J. Magn. Soc. Jpn., 6, 175 (1982).
- 5) Y. Kotsuka: J. Magn. Soc. Jpn., 21, 1159 (1997).
- 6) H. Ueno, T. Kondo and S. Yoshikado: J. Magn. Soc. Jpn., 22, 881 (1998).
- 7) T. Kondo, K. Asano, S. Yoshikado: The Transactions of The Institute of Electrical Engineers of Japan., 120-A, 211 (2000).
- 8) T. Soh, N. Yoshioka, K. Nakamura and O. Hashimoto: The Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, J82-B, 469 (1999).
- 9) 特願 2001-287288
- 10) T. Takagi: Electromagnetic Measurements and Architectural EMC, p.84 (CORONA Publishing, Tokyo, 2000).
- 11) 清水康敬, 杉浦行, 石野健: 最新電磁波の吸収と遮蔽, p.114 (日経技術図書, 東京, 1999).
- 12) O. Hashimoto: Introduction to Wave Absorber, p.26 (Morikita Shuppan, Tokyo, 1997).
- 13) O. Hashimoto: EMC, 151, 121 (2000).

2002 年 4 月 3 日受理, 2002 年 7 月 18 日採録