

# Fabrication and Evaluation of Composite Electromagnetic Wave Absorbers Made of Sendust Particles Dispersed in Polystyrene Resin

Seiki UMEMOTO, Naoki MORIKAWA, Fumiya OSAME, Yuuki SATO, Shinzo YOSHIKADO

(Received October 13, 2018)

The metal backed single-layer type electromagnetic wave absorbers with low cost, low environmental load using the composite made of polystyrene resin and sendust, which is alloy of Fe, Si, and Al and contains no rare element, were fabricated and the electromagnetic wave absorption characteristic was evaluated. It is necessary to select an absorption center frequency widely for the practical use and for an absorption frequency bandwidth to be wide. It was suggested that the important factor of the absorption mechanism was both the eddy current loss of a sendust particle and the magnetic loss. Measured values by a free space method the return loss agreed with calculated ones from the value of both the complex permeability and permittivity. The double-layer type electromagnetic absorbers were designed optimally and absorption bandwidth became wider compared with that for a mono-layer type absorber.

**Keywords** : electromagnetic wave absorber, composite of sendust and resin, wide frequency bandwidth of absorption, double-layer type electromagnetic wave absorber

**キーワード** : 電磁波吸収体, センダスト粒子・樹脂複合体, 吸収の広帯域化, 2層型電磁波吸収体

## センダスト粒子をポリスチレンに分散させた 複合電磁波吸収体の作製と吸収特性の評価

梅本 成貴, 森河 直樹, 納 文也, 佐藤 祐喜, 吉門 進三

### 1. まえがき

電子機器等の装置が他の装置の動作に影響を与えるような不要な電磁波を放射せず, 且つ外部から侵入する電磁波による故障等に対して十分な耐性を持つこと, いわゆる電磁環境両立性(Electromagnetic Compatibility: EMC)が求められてい

る. また, 近い将来実現されるであろう自動車の完全自動運転において, マイクロ波やミリ波が使用される可能性があり, 装置の誤動作を避けるために原因となる不要電磁波の除去は重要な課題になる可能性もある. これに, Global Positioning System (GPS, 現行 1.2, 1.5 GHz) を用いることも予想される. ま

\*Department of Electronics, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6687, FAX: +81-774-65-6801, E-mail: syoshika@mail.doshisha.ac.jp

た電気通信業務等では広い範囲の周波数が用いられている<sup>1)</sup>。今後、高度道路交通システム ITS (Intelligent Transport Systems) などの無線通信で使用される電磁波は、現在利用されている周波数帯より高い周波数領域に移行することが予想される<sup>1,2)</sup>。これらの課題や問題を解決する方法の一つとして電磁波吸収体の利用が挙げられる。

電磁波吸収体とは、入射した電磁波のエネルギーを熱エネルギーに変換し電磁波の反射、透過を抑制するデバイスである<sup>2-17)</sup>。多様な用途に使用されるケースが増加することが予想され、複数の周波数帯をカバーする広帯域な吸収特性を持つ電磁波吸収体が必要となる可能性がある。その場合、実用性の観点から利用目的に応じて吸収周波数帯域を容易に変更でき、低コスト、低環境負荷で軽量、薄型などの付加価値を有することも必要とされる。以上のことを勘案して、本研究では数 GHz 以上の任意の周波数領域において広帯域な電磁波吸収特性を持ち、前述の付加価値を有する電磁波吸収体を開発することを目的とする。種々の粒子形状を有する磁性体粒子あるいは磁性体粒子を誘電体に分散したものが吸収体材料として使用されている。

粒子形状として、主に、フレーク状および球状(粒状)がある。形状に応じて磁気的性質が異なる。フレーク状では粒子配列を制御することにより異方性をもたせることが可能になり、特定の方向から入射する電磁波に対して吸収性能を向上させることが可能である。一方、粒状磁性体の場合は磁気的性質に異方性が生じにくく、一般的な電磁波吸収体として適している<sup>16-27)</sup>。材料としてセンダスト粒子を樹脂に分散させた複合体に着目した。センダストは Fe, Si, Al の合金であり希少元素を含まず安価であり、しかも高耐酸化性軟磁性体であり、導電率も極めて大きい<sup>11,17-21)</sup>。また再利用も容易である。フレーク状のセンダストを用いた場合、前述のように吸収特性に異方性が生じることと、吸収量および吸収帯域幅が狭いことが上げられる。これは酸化物以外の磁性体粒子が導電性をもち、フレーク状の場合粒子間の接触により電磁波の反射が大きくなるためである。一方、粒状磁性体を誘電体に分散させて複

合体を製作した場合、磁性体粒子の混合量を増加させてもフレーク状粒子よりも粒子間の接触が生じにくいために、結果として混合量の範囲が広くなるために吸収量および吸収帯域幅を制御しやすくなりそれらの向上がより期待される。これまでの研究により、平均粒径 5  $\mu\text{m}$  の粒状のセンダスト粒子をポリスチレン樹脂に体積混合率で 20.0 vol% 程度混合し分散させた平板状の複合体を用いて作製した後面に完全反射層をもつ単層型電磁波吸収体が従来例を見ない極めて広い周波数帯域で良好な吸収特性を示すことが報告された<sup>11,12)</sup>。しかし、吸収特性は入射電磁波伝送線路法により測定された材料定数である複素比誘電率  $\epsilon_r^*(=\epsilon_r'-j\epsilon_r'')$ ,  $j=(-1)^{1/2}$  および複素比透磁率  $\mu_r^*(=\mu_r'-j\mu_r'')$  から算出されたものであり、自由空間法による測定は行われていなかった。吸収性能を示す指針として 99%以上(電力反射損失量(今後リターンロスと呼ぶ)が-20dB以下)を示す周波数帯域幅帯域幅を吸収が最大となる周波数(吸収中心周波数  $f_0$ )で割った値を本研究では-20 dB 規格化帯域幅と呼ぶことにする。-20 dB 規格化帯域幅が広い吸収体ほど、寸法誤差等の製品のばらつきに対し高い余裕度をもつ。しかし 1 GHz 以上の周波数用に従来開発された吸収体の-20 dB 規格化帯域幅は一部を除けば、10 %以下であった。一方、前述の平均粒径 5  $\mu\text{m}$  のセンダスト粒子複合体を用いて作製した単層型電磁波吸収体の場合には計算値として 20 %以上の-20dB 規格化帯域幅を示した<sup>11)</sup>。センダスト以外のコバルト、パーマロイ等の軟磁性体のみを樹脂に分散させた単層型複合電磁球体の報告もある<sup>13)</sup>。しかし、コストの問題の他に複素透磁率の周波数依存性の違いにより、センダスト複合体の方が結果的に-20dB 規格吸収帯域幅が広いと考えられる。

しかし、高吸収性能を有するセンダスト複合体は、電磁波吸収の要因である電磁波のエネルギーを熱に変換する要因について未だ不明な点があった<sup>12)</sup>。本研究では、先ずその要因について検討を行った。ところで、単層型の電磁波吸収体では、均質な材料を用いる場合吸収特性は材料定数と平板の厚さのみによって決定される。したがって吸収特性を向上

させるために調整し得るパラメータの数が少なく、周波数帯域幅や入射角度の拡張には限界がある。この欠点を補う一方法として吸収体を多層構造にする方法がある<sup>4)</sup>。多層構造そのものは従来から多くの研究があるが、本研究では、前述のように単層構造でも吸収帯域幅が従来の吸収体よりも格段に広い複合体をさらに多層構造にして吸収帯域幅がさらに広い吸収体を実現することを目的としている。次にセンダストの体積混合率が異なる 2 枚の平板状の複合体を接合して、2 層型電磁波吸収体の体積混合率、各層の厚さおよび  $\mu_r^*$ 、 $\epsilon_r^*$  の種々の値についてリターンロスの周波数特性を算出し吸収特性の評価を行うとともに、実際に吸収体を試作し吸収特性の実測値と計算値の比較を行った。なお、本研究では評価装置の制限から目的とする吸収帯域を 2.5~18 GHz とした。

## 2. 実験方法

### 2.1 複合体の作製

ポリスチレン樹脂をアセトンで溶解し、そこに平均粒径がメーカ仕様で約 3.5 あるいは 5  $\mu\text{m}$  の粒状センダスト粒子 (日本アトマイズ: Fe85%-Si10%-Al5%) を体積混合率  $V$  が 12.7, 20.0, 28.0 vol% で混合した<sup>11)</sup>。粒子の平均粒径の測定をマイクロトラック (Microtrac S3500) で行った。Fig. 1 に平均粒径 5  $\mu\text{m}$  のセンダスト粒子の粒度分布を示す。実際の平均粒径は約 5.3  $\mu\text{m}$  であり、粒度分布の形状から粒子間の凝集による 2 次粒子の生成は少ないと考えられる。平均粒径 3.5  $\mu\text{m}$  の粒子についても同様の結果が得られた。アセトンを十分に乾燥させた後、複合体を粉砕しホットプレス法により以下に示す手順で 140 mm 四方の平板状試料を作製した：粉砕した複合体粉末を後面反射層として機能する厚さ 2 mm のアルミニウム板を敷いた金型に投入し、190°C で 4 時間加熱した後 150°C まで冷却し 10 ton の荷重でプレスした。その後、室温まで冷却し、金型から試料を取り出した。このアルミ板付き複合体平板を単層型電磁波吸収体試料とした。作製した試料の厚さは、異なる複数点測定した平均値とした。作製された試料を伝送線路法で評価するために、

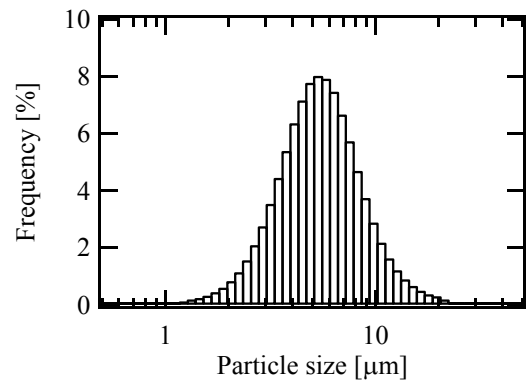


Fig. 1. Measured distribution of the diameter of sendust particles with the average diameter of 5  $\mu\text{m}$ .

試料の数カ所から切り出し次節に示すように加工した。Fig. 2 に平均粒径 5  $\mu\text{m}$  のセンダスト粒子のポリスチレン樹脂中での分散状態の光学顕微鏡写真を示す。凝集粒子はほとんどなく分散性が高いことが分かった。粒子間の平均距離は 12.7, 20.0, 28.0 vol% に対してそれぞれ約 13, 11, 10  $\mu\text{m}$  であった。単層型電磁波吸収体 2 枚を接着剤で貼り合わせて 2 層型電磁波吸収体を作製した。

### 2.2 測定方法

トロイダルコアあるいは直方体形状に加工した試料をそれぞれ同軸線路 (7 mm, 0.1~12 GHz) あるいは規格矩形導波管 (12~18 GHz) 内に装荷し、伝送線路法によりベクトルネットワークアナライザ (VNA, HP8722ES) を用いて、Full-2port 法により 0.1~18 GHz の周波数範囲で複素散乱定数 ( $S^*$  パラメータ) を測定し  $\mu_r^*$  と  $\epsilon_r^*$  を算出した<sup>11)</sup>。また VNA

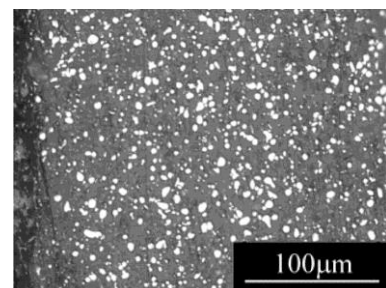


Fig. 2. Optical microphotograph of the dispersion state of sendust particles of 20.0 vol% with average size of 5  $\mu\text{m}$  in polystyrene resin.

(HP8510C, Keysight Tec.)とダブルリッジホーンアンテナ (3115, ESCO Tec.) および誘電体レンズ付き導波管アンテナ (MX-DLA151, MMEX Inc., アムテックス) を用いて Fig. 3 に示す自作の斜入射特性評価装置により自由空間中で反射電力法により 2.5~18 GHz の周波数範囲でリターンロスを測定した. このとき試料とアンテナの距離を 20cm とした. また, VNA のタイムドメインゲーティング機能を用いて不要な反射波の除去を行った. なお, 測定の正確さを評価するために標準試料としてアクリル樹脂平板を用いて測定し  $\mu_r^*$  および  $\epsilon_r^*$  の測定を行った. その結果, 従来報告されている値と良く一致した.  $\mu_r^*$  および  $\epsilon_r^*$  の値より任意の厚さに対する自由空間中に置かれた反射層で裏打ちした電磁波吸収体のリターンロス  $R$  を次節に示す方法により算出した.

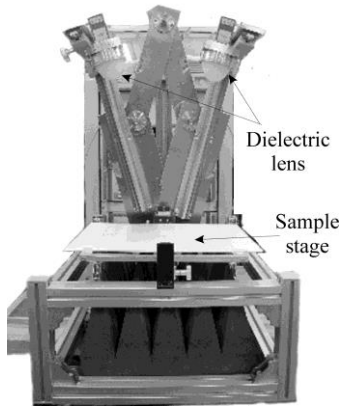


Fig. 3. Oblique incidence characteristic measurement system.

### 2.3 2層型電磁波吸収体のリターンロス

電磁波の平面波が完全反射版で終端した 2 層型電磁波吸収体の入射面に対して垂直方向に対して  $\theta_0$  [°] だけ斜めに入射する場合, 入射面から 2 層型吸収体をみた入力インピーダンス  $Z_{in}$  を等価自由空間特性インピーダンス  $Z_{0e}$  で規格した規格化入力インピーダンス  $z_{in}$  は次式で与えられる<sup>4)</sup>.

$$z_{in} = \frac{Z_{in}}{Z_{0e}} = \frac{Z_1}{Z_{0e}} \frac{Z_2/Z_{0e} \tanh \gamma_2 d_2 + Z_1/Z_{0e} \tanh \gamma_1 d_1}{Z_1/Z_{0e} + Z_2/Z_{0e} \tanh \gamma_2 d_2 \tanh \gamma_1 d_1} \quad (1)$$

ただし,  $Z_1$ ,  $\gamma_1$ ,  $d_1$  は入射面側の 1 層目 (表面層), また  $Z_2$ ,  $\gamma_2$ ,  $d_2$  は 2 層目 (中間層) のそれぞれ等価特性インピーダンス, 等価伝播定数, 厚さである.  $\theta_0$  と表面層の屈折角  $\theta_1$  および  $\theta_1$  と中間層の屈折角  $\theta_2$  の間には各層の損失が小さいときは近似的にスネルの法則が成立するので, 表面層および中間層のそれぞれ規格化特性インピーダンス  $z_1$  および  $z_2$  は TE (Transverse Electric) および TM (Transverse Magnetic) 波に対してそれぞれ次式で与えられる.

TE 波 :

$$z_1 = Z_1/Z_{0e} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_{r1}^*}{\epsilon_{r1}^*}} Z_0 \frac{1}{\cos \theta_1}}{Z_0 \frac{1}{\cos \theta_0}} = \frac{\mu_{r1}^* \cos \theta_0}{\sqrt{\mu_{r1}^* \epsilon_{r1}^* - \sin^2 \theta_0}} \quad (2)$$

$$z_2 = Z_2/Z_{0e} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_{r2}^*}{\epsilon_{r2}^*}} Z_0 \frac{1}{\cos \theta_2}}{Z_0 \frac{1}{\cos \theta_0}} = \sqrt{\frac{\mu_{r2}^*}{\epsilon_{r2}^*}} \cos \theta_0$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\mu_{r1}^* \epsilon_{r1}^*}{\mu_{r2}^* \epsilon_{r2}^*} \frac{1}{\mu_{r1}^* \epsilon_{r1}^*} \sin^2 \theta_0}} = \frac{\mu_{r2}^* \cos \theta_0}{\sqrt{\mu_{r2}^* \epsilon_{r2}^* - \sin^2 \theta_0}} \quad (3)$$

TM 波 :

$$z_1 = \frac{\sqrt{\mu_{r1}^* \epsilon_{r1}^* - \sin^2 \theta_0}}{\epsilon_{r1}^* \cos \theta_0}, \quad z_2 = \frac{\sqrt{\mu_{r2}^* \epsilon_{r2}^* - \sin^2 \theta_0}}{\epsilon_{r2}^* \cos \theta_0} \quad (4)$$

また等価伝播定数は TE 波および TM 波ともに次式で与えられる.

$$\gamma_1 = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{r1}^* \epsilon_{r1}^* - \sin^2 \theta_0}, \quad \gamma_2 = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_{r2}^* \epsilon_{r2}^* - \sin^2 \theta_0} \quad (5)$$

ただし  $\mu_{r1}^*$ ,  $\epsilon_{r1}^*$  および  $\mu_{r2}^*$ ,  $\epsilon_{r2}^*$  はそれぞれ表面層および中間層の複素比透磁率および複素比誘電率,  $\lambda$  は入射電磁波の波長である. 以上より 2 層型電磁波吸収体の斜入射に対する反射係数  $\Gamma^*$  は次式で与えられる.

$$\Gamma^* = \frac{z_{in}^* - 1}{z_{in}^* + 1} \quad (6)$$

リターンロス  $R$  は次式で与えられる.

$$R = -20 \log_{10} |\Gamma^*| \quad (7)$$



### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 吸収特性に寄与する要因

粒状の磁性材料を用いた電磁波吸収体では  $\epsilon_r^*$  の実部はほぼ一定、且つ虚部は実部と比較して微小な値をもち、2 次の量を計算上無視できると考えられる。そこで複合体の誘電率を、測定値から体積混合率  $V=12.7, 20.0, 28.0 \text{ vol\%}$  に対しそれぞれ  $\epsilon_r^*=4.6-j0, 5.9-j0, 7.0-j0$  と仮定した。虚数部はセンダスト粒子が粒状であることおよび  $V$  がパーコレーション閾値以下であることより測定値はほぼ0であったので0とした。 $\mu_r^*$  に寄与する現象として磁気共鳴に加えてセンダストの導電率  $\sigma$  が室温で約  $1.25 \times 10^6 \text{ S/m}$  と銅の約  $1/4$  の大きさをもつので渦電流の寄与も考慮する必要がある<sup>14)</sup>。渦電流が流れるとそれによる磁気モーメントが生じる。マイクロ波領域で重要となるセンダストの磁気効果には磁壁共鳴  $\mu_{rD}^*$  と回転磁化共鳴  $\mu_{rS}^*$  の2つがある<sup>15)</sup>。

$$\mu_{rD}^* = \frac{\mu_{0rD}}{1+j\omega\tau}, \quad \mu_{rS}^* = \frac{\mu_{0S}}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\gamma} \quad (8)$$

ただし  $\mu_{0rD}$  は定数、 $\omega$  は電磁波の角周波数、 $\tau$  は緩和時間、 $\mu_{0S}$  は定数、 $\omega_0$  は共鳴角周波数、 $\gamma$  は減衰定数である。

前述のように、センダストは比較的高い導電率を持つことから表皮効果によってセンダスト粒子の表面に流れる渦電流による反磁性的効果による透磁率  $\mu_{rE}^* (= \mu_{rE}' - j\mu_{rE}'')$  は次式で与えられる<sup>14)</sup>。

$$1 - \mu_{rE}' = N\pi a \omega^2 A e^{-\frac{a}{\delta}} \times \left[ \delta(2\delta^2 - 2a\delta + a^2)(e^{\frac{a}{\delta}} - 1) - a\delta(2\delta - a) \right] \quad (9)$$

$$\mu_{rE}'' \approx \mu_r' \frac{P}{\frac{\omega}{2} \mu_r' \mu_0 \iiint H^2 dv} = \frac{Ng(a)}{\frac{\omega}{2} \mu_0 (1-V) + Nh(a)} \quad (10)$$

ただし、

$$g(a) = \frac{2\pi a A^2 e^{-\frac{2a}{\delta}}}{\sigma} \left[ -\frac{\delta^2}{4} \left( e^{\frac{2a}{\delta}} - 1 \right) + \frac{a\delta}{2} e^{\frac{2a}{\delta}} \right], \quad (11)$$

$$h(a) = \pi a \omega \mu_{dr}' \mu_0 \left[ a^2 + 4A\delta \left( \frac{1}{2} a^2 - \delta a + \delta^2 - \delta^2 e^{-\frac{a}{\delta}} \right) + A^2 \delta^2 \left( a^2 - 3\delta a + \frac{7}{2} \delta^2 - 4\delta^2 e^{-\frac{a}{\delta}} + \frac{1}{2} e^{-\frac{2a}{\delta}} \delta^2 \right) \right], \quad (12)$$

$$A = \frac{-(\omega \mu_0 \sigma)^2 \delta \left( \frac{1}{2} a^2 + \delta^2 - \delta^2 e^{-\frac{a}{\delta}} - a\delta \right)}{1 + \left( \frac{\omega \mu_0 \sigma}{a} \right)^2 \delta^2 \left[ \left( \frac{1}{2} a^2 + \delta^2 - \delta^2 e^{-\frac{a}{\delta}} - a\delta \right) \right]^2} \quad (13)$$

ただし、 $a$  は粒子と同体積の円柱の半径および高さである。 $\delta$  は表皮深さであり次式で与えられる。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0 \mu_r'}} \quad (14)$$

ただし、 $\sigma$  はセンダスト粒子の導電率である。

(9)~(14)式はアルミニウム等の常磁性金属微粒子を樹脂に分散させて作製した複合体の複素透磁率の周波数依存性の測定値に対し、粒子の直径と導電率のみを代入することにより算出した計算値に良く一致した<sup>14)</sup>。特に粒子の直径が数  $\mu\text{m}$  の場合、数~数十 GHz 帯で渦電流損により透磁率の虚数部の大きさが最大となる。

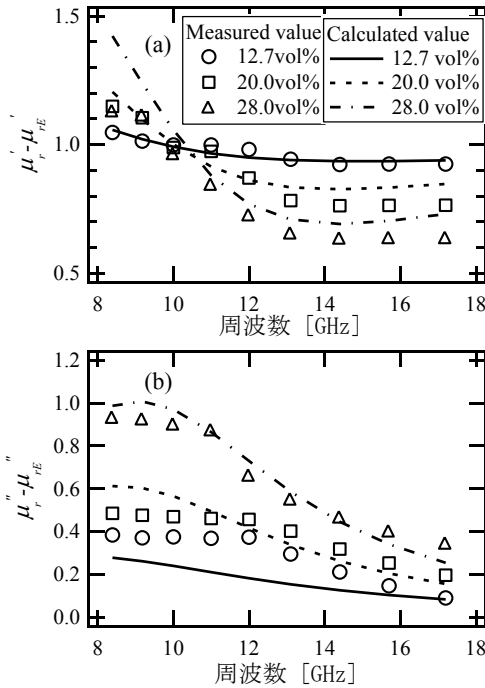
用いられるセンダスト粒子の形状はほぼ球形であるので、混合則として Maxwell-Garnett (MG) 則が妥当であると考えられる<sup>15)</sup>。磁壁共鳴、回転磁化共鳴、渦電流の寄与を考慮した MG 則を用いると複合体の  $\mu_r^*$  は以下の式で与えられる<sup>12,15)</sup>。

$$\mu_r^* = 1 + \frac{3V(\mu_{rD}^* + \mu_{rS}^*)}{3 + (1-V)(\mu_{rD}^* + \mu_{rS}^*)} + \mu_{rE}^* \quad (15)$$

複素比透磁率の 0.1~18 GHz の周波数範囲での実測値から  $\mu_{rE}^*$  の計算値を差し引いたものに (14) 式を用いて最小 2 乗法を用いてフィッティングを行って得られた  $\mu_{rD}^*$  と  $\mu_{rS}^*$  の各パラメータの値を Table 1 に示す。また、フィッティング結果を Fig. 4 に示す。両者はまずまずの一致が見られ、特に実数部はよく一致した。Fig. 4(a) に示すように、注目している 2.5~18 GHz の周波数範囲では、体積混合率  $V$  が増加するに従い複素比透磁率の実数部  $\mu_r'$  が減少し、より低周波領域の大小関係が逆転した。一方、虚数部  $\mu_r''$  は  $V$  が増加するに従い増加した。渦電流は表皮深さが粒径と比較して浅くなる周波数帯域では  $\mu_r'$  を減少させ、一方  $\mu_r''$  すなわち磁気的損失を増加させる働きがある。以上より注目している周波数

Table 1. Values of fitting parameter of  $\mu_{rD}^*$  and  $\mu_{rS}^*$ .

Parameters	Volume mixing ratio [vol%]		
	12.7	20.0	28.0
$\mu_{rD}$	$8 \times 10^2$	$6 \times 10^2$	$4 \times 10^2$
$\tau$ [s]	$8 \times 10^{-8}$	$8 \times 10^{-8}$	$8 \times 10^{-8}$
$\mu_{rOS}$	$9.0 \times 10^{21}$	$1.1 \times 10^{22}$	$1.3 \times 10^{22}$
$\omega_0$ [rad/s]	$4.0 \times 10^9$	$4.4 \times 10^9$	$4.8 \times 10^9$
$\Gamma$ [s]	$8 \times 10^{10}$	$6.3 \times 10^{10}$	$6 \times 10^{10}$

Fig. 4. Measured and fitted values of (a)  $\mu_r'$  and (b)  $\mu_r''$  for composites made of 5  $\mu\text{m}$  particles for various values of  $V$ .

範囲では磁気的な性質に渦電流が大きな寄与をしていることが分かった。したがって磁壁共鳴および回転磁化共鳴による損失がさらに増加するとともに  $\mu_r'$  が減少し、整合条件に近くなるために吸収性能が向上することが分かった。

### 3.2 2層型単層型電磁波吸収体の吸収特性

入射面側が電磁波吸収体の性能は、入射面における吸収体を見たインピーダンスすなわち入力インピーダンスが自由空間の特性インピーダンスに等しくなることである。これを実現するには吸収体内で電磁波のエネルギーを熱に変換するいわゆる損失が必要である。そのためには先ず表面層で電磁波

をできる限り多く入射させ、中間層内部でできる限り電磁波のエネルギーを熱に変換する必要があるが、この2つの働きを単相の吸収体で実現することは多くの場合二律背反的であり吸収性能を向上させることは極めて困難である。ニッケル亜鉛フェライトの単層型電磁波吸収体は、入力インピーダンスが、UHF帯ではその複素透磁率の周波数依存性により整合条件に近くなるために、-20 dB規格化帯域幅が60%以上の極めて広帯域な吸収性能を有する極めて希な例である<sup>11)</sup>。

例えば、2層型電磁波吸収体の場合には入射面側の表面層が電磁波の入射を容易にし、続く中間層で熱に変換にすることにより吸収性能の向上が向上する。この場合、表面層と中間層の界面での電磁波の反射係数は複合体を適切に選択すると、中間層に電磁波を閉じ込めて熱に変換させることにより結果としてより小さくなる。

#### 3.2.1 単層型単層型電磁波吸収体の吸収特性

先ず2層構造の各層に使用する複合体の各特性について調べた。平均粒径3.5  $\mu\text{m}$ のセンダスト粒子を用いた。各体積混合率  $V$  について作製した平板試料の一部から切り取って作製した試料の材料定数  $\mu_r^*$  および  $\epsilon_r^*$  を測定し、これらよりリターンロスを算出し、30 mmまでの厚さに対して-20 dB規格化帯域幅および吸収中心周波数  $f_0$  を求めた結果をFig. 5に示す。 $V$  が12.7 vol%を除き比較的広い厚さの範囲で-20 dB以下(99%以上)の吸収が見られた。吸収中心周波数  $f_0$  は厚さが増加するに従い減少した。下限の周波数は  $V$  が28 vol%の場合約5 GHzであったが、センダスト粒子の粒径を大きくすることにより  $f_0$  をより低くすることが可能である。実際、本論文には示されていないがセンダスト粒子平均粒径が20  $\mu\text{m}$ の場合下限周波数は3 GHz以下となった。最も広帯域な吸収を示した20.0 vol%の試料に対して厚さ2.5 mmの平板状試料を作製し自由空間法による測定したリターンロスと  $\mu_r^*$  および  $\epsilon_r^*$  の測定値から算出したリターンロスの計算値の周波数特性を比較したものをFig. 6に示す。両者は良い一致を

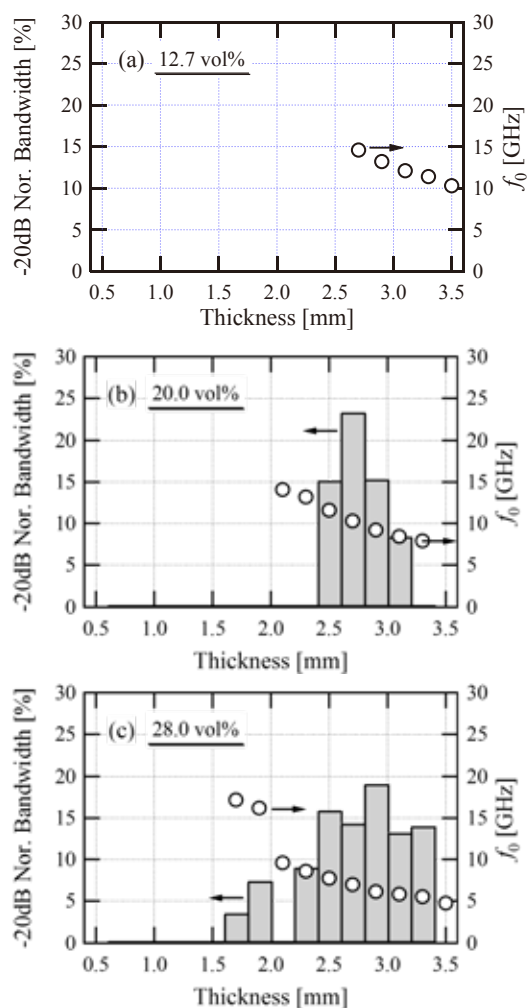


Fig. 5. The relationship between -20 dB normalized bandwidth,  $f_0$  and thickness of mono-layer type absorber for each  $V$ .

示した。これより単層型電磁波吸収体の場合計算値から測定値を予測できることが確認された。

### 3.2.2 2層型単層型電磁波吸収体の吸収特性

2層構成のメリットとしてリターンロスの大きさが最大となる2つの $f_0$  (2つの吸収ピーク) が得られることがある。お互いに近接する2つの $f_0$ でリターンロスが-20dB以下になるように2層型電磁波吸収体の設計をすることで単層型電磁波吸収体よりも広い吸収帯域幅を持つことができると考えられる。各 $V$ に対する材料定数と2枚の平板複合体のすべての組み合わせおよび厚さを変化させてリターンロスを算出した結果、Fig. 7に示すように-20 dB規格

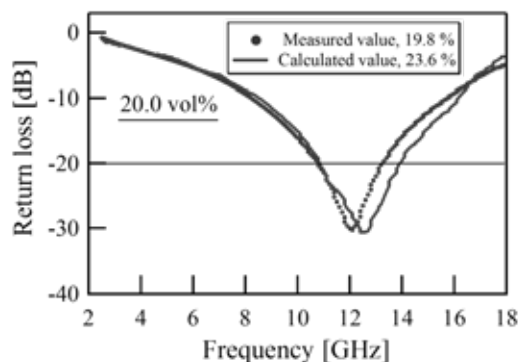


Fig. 6. Comparison with measured and calculated values of the frequency dependence of the return loss for mono-layer type absorber made of composite with  $V$  of 20 vol% and thickness of 2.5 mm.

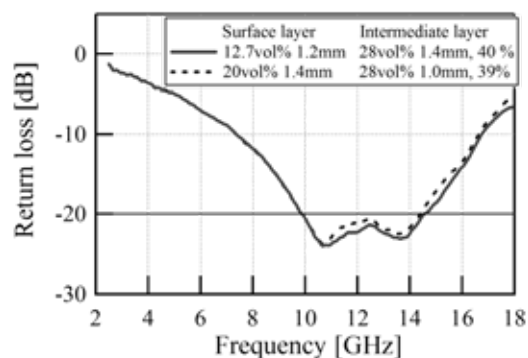


Fig. 7. Calculated values of the frequency dependence of the return loss of double-layer type absorbers to two rates of volume mixture and thickness which show the largest -20 dB normalized bandwidth.

化帯域幅が約 40 %と極めて広く、単層型電磁波吸収体よりも約 1.5 倍以上広帯域な吸収特性を持つものが複数存在する事が確認できた。表面層では $V$ が中間層よりも小さく、入射波が吸収体内に入りやすく、損失の大きい中間層で熱に変換する構造になることが分かる。本研究では3種類のセンダストの体積混合率 $V$ の複合体のみについて検討を行ったが、さらに細かく $V$ を調整することによりさらなる広帯域化が期待される。また、以上の広帯域な吸収帯域をもつ2層型電磁波吸収体は2層の厚さの

合計が単層で広帯域な吸収特性を持ったものと同程度の 2.5 mm 前後になり、薄型で広帯域吸収が可能な電磁波吸収体の実現が可能であることが分かった。

次に斜入射特性について検討した。2 層型電磁波吸収体の垂直入射のリターンロスの計算値で比較的広帯域な吸収特性を示した  $V$  が 12.7 vol%, 厚さが 1.4 mm の表面層と  $V$  が 28.0 vol%, 厚さが 1.2 mm の中間層からなる 2 層型電磁波吸収体を作製し、Fig. 3 に示した自作の斜入射特性評価システムを用いて自由空間法で TE および TM 波について入射角  $\theta_0$  を 15~60°まで変化させてリターンロスの周波数特性を測定した。また(2)~(7)式を用いてリターンロスの周波数特性を算出した。それらの結果を Fig. 8 に示す。測定値と計算値の間にはずれがあるものの

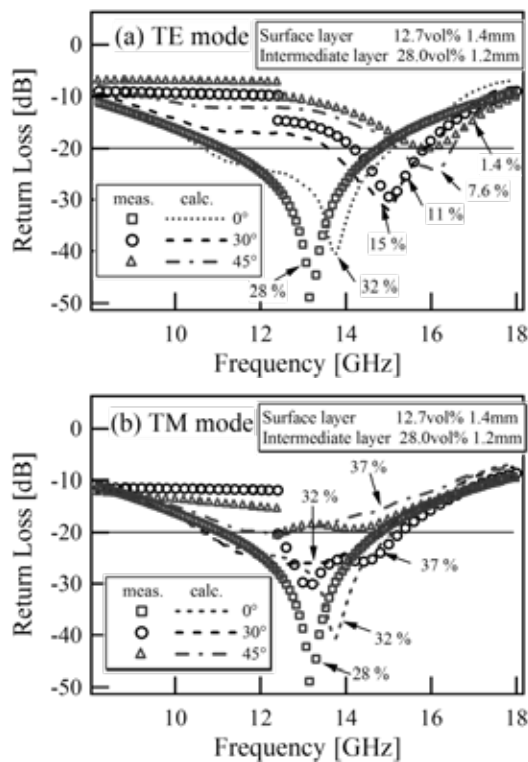


Fig. 8. Calculated values of the return loss for oblique (a) TE and (b) TM waves incidence to double-layer type absorbers made of the surface layer and the intermediate layer with volume mixture ratio of 12.7 and 28 vol% and thickness of 1.4 and 1.2 mm, respectively.

定性的な一致が見られた。 $\theta_0$  が約 0~45°まではリターンロスが -20 以下となり、良好な斜入射特性が得られた。

#### 4. まとめ

- (1) センダスト粒子をポリスチレン樹脂に分散させて作製した複合体の電磁波のエネルギーの熱への変化に機構として、磁気共鳴吸収加えてセンダストの高い導電性による渦電流損が大きく寄与していることが分かった。これにより複合体を用いて作製した完全反射板で終端した単層型電磁波吸収体が極めて広い -20dB 規格化帯域幅を有する理由が明確となった。
- (2) 複合体の材料定数である複素比透磁率  $\mu_r^*$  および複素比誘電率  $\epsilon_r^*$  の測定値から算出した単層型電磁波吸収体のリターンロスの計算値は自由空間法での測定値に良く一致した。これにより材料定数を用いて算出したリターンロスの計算値を吸収帯の設計・評価に用いることが可能であることが確認された。
- (3) 体積混合率の異なる複合体を用いて作製した 2 層型複合電磁波吸収体において、表面層と中間層の組み合わせおよび各層の厚さを適切に選択することにより、-20 dB 規格化帯域幅の最大値は約 40%となった。また、その場合の全厚さは単層型で最大のリターンロスを与える厚さと同程度であり、2 層構造にしても厚さは大きく増加しないことが分かった。
- (4) 2 層型電磁波吸収体のリターンロスの斜入射吸収特性の測定値と計算値の間にはずれがあるものの定性的な一致が見られた。

今後、3 層以上の多層型電磁波吸収体の設計・製作を行い、さらなる吸収の広帯域化の可能性について検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 使用状況の詳細, 総務省電波利用ホームページ (2018).
- 2) 清水康敬他, 最新電磁波の吸収と遮蔽, (日経技術図書, 東京, 1999), pp.126-129.
- 3) 小塚洋二, 最新マイクロ波エネルギーと応用技術, 最



- 新マイクロ波エネルギーと応用技術編集委員会編, (産業技術サービスセンター, 東京, 2014), pp.890–895.
- 4) 橋本修, 電波吸収体入門, (森北出版, 東京, 1997).
  - 5) Y. Natio, K. Suetake, "Application of Ferrite to Electromagnetic-Wave-Absorber and Its Characteristics", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **1**, 65–72 (1971).
  - 6) H. Bayrakdar, "Electromagnetic Propagation and Absorbing Property of Ferrite-polymer Nanocomposite Structure", *Progress in Electromagnetics Research M*, **25**, 269–281 (2012).
  - 7) S. Sugimoto, K. Okayama, S. Kondo, H. Ota, M. Kimura, Y. Yoshida, H. Nakamura, D. Book, T. Kagotani, M. Homma, "Barium M-type Ferrite as an Electromagnetic Microwave Absorber in the GHz Range", *Mater. Trans.*, **39**, 1080–1083 (1998).
  - 8) A. Sihvola, "Two Main Avenues Leading to the Maxwell Garnett Mixing Rule", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **15**, 715–725 (2001).
  - 9) S. M. Abbas, A. K. Dixit, R. Chatterjee, T. C. Goel, "Complex Permittivity, Complex Permeability and Microwave Absorption Properties of Ferrite-Polymer Composite", *J. Magn. Magn. Mater.*, **309**, 20–24 (2007).
  - 10) W. Yang, S. Yu, R. Sun, R. Du, "Effects of BaTiO<sub>3</sub> and FeAlSi as Fillers on the Magnetic, Dielectric and Microwave Absorption Characteristics of the Epoxy-Based Composites", *Ceramics International*, **38**, 3553–3562 (2012).
  - 11) K. Sakai, Y. Guan, Y. Sato, S. Yoshikado, "Effect of Particle Shape on Absorption Characteristics of Composite Electromagnetic Wave Absorber Made of Sendust Particles Dispersed in Polystyrene Resin", *ICC3 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **18**, 092019 (2011).
  - 12) Y. Hongo, K. Sakai, Y. Sato, S. Yoshikado, "Absorption Characteristics of Composite Electromagnetic Wave Absorber Made of Sendust Particles Dispersed in Polystyrene Resin", *Key Eng. Mater.*, **566**, 215–218 (2014).
  - 13) T. Kasagi, S. Suenaga, T. Tsutaoka, K. Hatakeyama, "High Frequency Permeability of Ferromagnetic Metal Composite Materials", *J. Magn. Magn. Mater.*, **310**, 2566–2568 (2007).
  - 14) K. Sakai, Y. Wada, Y. Sato, S. Yoshikado, "Design of Composite Electromagnetic Wave Absorber Made of Fine Aluminum Particles Dispersed in Polystyrene Resin by Controlling Permeability", *PIERS Online*, **5**, 663–670 (2009).
  - 15) T. Tsutaoka, "Frequency Dispersion of Complex Permeability in Mn–Zn and Ni–Zn Spinel Ferrites and Their Composite Materials", *J. Appl. Phys.*, **93**, 2789–2796 (2003).
  - 16) J. R. Liu, M. Itoh, K. Machida, "Electromagnetic Wave Absorption Properties of Fe<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (x = 0.33, 0.5, 0.67) Nanocomposites in Gigahertz Range", *J. Alloys Compounds*, **389**, 265–269 (2005).
  - 17) Q. Li, S. Yan, X. Wang, Z. Feng, Y. Chen, V. G. Harris, "Enhanced Microwave Absorption of Flake-Oriented Sendust Sheets by Tape Casting", *IEEE Trans. Magn.*, **51**, 2802404 (2015).
  - 18) M. Han, L. Deng, "Understanding the Enhanced Microwave Permeability of Fe-Si-Al Particles by Mössbauer Spectroscopy", *J. Magn. Magn. Mater.*, **337–338**, 70–73 (2013).
  - 19) L. Liu, Z. H. Yang, C. R. Deng, Z. W. Li, M. A. Abshinova, L. B. Kong, "High Frequency Properties of Composite Membrane with In-plane Aligned Sendust Flake Prepared by Infiltration Method", *J. Magn. Magn. Mater.*, **324**, 1786–1790 (2012).
  - 20) N. Zhang, X. Wang, J. Xie, L. Deng, "Influence of Si/Cr Ratio on Flake Morphology and Magnetic Properties of Fe-Si-Al-Cr Particles", *IEEE Magnetics Letters*, **7**, 3706005 (2016).
  - 21) K. Récko, D. Satuła, L. Dobrzyński, M. Biernacka, J. Waliszewski, A. Go, J. J. Milczarek, "Magnetic and Structural Properties of Fe<sub>3-x</sub>Cr<sub>x</sub>Al<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub>", *In J. Phys.: Conf. Ser.*, **340**, 012070 (2012).
  - 22) X. Wang, J. Li, N. Zhang, J. Xie, D. Liang, L. Deng, "Evolution of Hyperfine Structure and Magnetic Characteristic in Fe-Si-Cr Alloy with Increasing Heat Treatment Temperature", *Mater. Des.*, **96**, 314–322 (2016).
  - 23) Z. H. Yang, Z. W. Li, Y. H. Yang, L. Liu, L. B. Kong, "Dielectric and Magnetic Properties of NiCuZn Ferrite Coated Sendust Flakes Through a Sol–Gel Approach", *J. Magn. Magn. Mater.*, **331**, 232–236 (2012).
  - 24) C. P. Neo, Y. Yang, J. Ding, "Calculation of Complex Permeability of Magnetic Composite Materials using Ferromagnetic Resonance Model", *Appl. Phys.*, **107**, 083906 (2010).
  - 25) M. Han, W. Tang, W. Chen, H. Zhou, L. Deng, "Effect of Shape of Fe Particles on Their Electromagnetic Properties within 1–18 GHz Range", *J. Appl. Phys.*, **107**, 09A958 (2010).
  - 26) Z. W. Li, L. Chen, C. K. Ong, Z. Yang, "Static and Dynamic Magnetic Properties of Co<sub>2</sub>Z Barium Ferrite Nanoparticle Composites", *J. Mater. Sci.*, **40**, 719–723 (2005).
  - 27) R. K. Walser, W. Win, P. M. Valanju, "Shape-Optimized Ferromagnetic Particles with Maximum Theoretical Microwave Susceptibility", *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1390–1392 (1998).