

# ナノメートルオーダーの表面化学組成制御を行った SiC系繊維を用いたマイクロ・ミリ波帯域の電磁波シールド材料

Micro/Mili Wave Electromagnetic Shielding Material Using Nano-Meter Order Surface Modified SiC-Base Fiber

射場久善\*・今橋祐輔\*\*・香川豊\*

Hisayoshi IBA, Yuusuke IMAHASHI and Yutaka KAGAWA

## 1. 目 的

高度情報化社会の発達につれ、情報の伝達にいろいろな周波数の電波が用いられるようになり、電気機器の誤作動などの電磁波障害や電磁波の人体に対する害などが数多く報告されるようになってきた。このような障害を防止するために、フェライトや炭素などの材料を利用した電波吸収体が用いられている。しかし、材料自体の密度が大きいことや、近い将来の数十GHz領域に対応するものが得られないこと、などの問題点を抱えている [1-4]。このような理由から、今後の情報化社会に対応し、電磁波障害をなくすことのできる軽量で広帯域の電波吸収体の実現が望まれている。

SiC系繊維は複合材料の強化用繊維として従来から用いられている繊維であるが、組成が非化学量論のものでは、製造過程の熱処理条件を制御することで、表面のナノメートルオーダーの化学組成を変化させることができる。特に、SiC系繊維の表面に電気伝導に富むナノメートルオーダー層を析出させた構造としたものは、抵抗損失や誘電損失の機構を利用した電波吸収体としての利用が可能であると考えられる。

しかし、表面のナノオーダー構造制御を行ったSiC系繊維の特性と電磁波吸収特性の関連性という観点からの報告はない。本研究では、SiC系繊維複合材料の電磁波吸収特性を測定することにより、SiC系繊維の誘電特性ならびに電磁波吸収特性を調べ、新しい電磁波吸収材料を作製することの可能性を検証することを目的とした。

## 2. 実験方法

- (1) 複合材料の誘電特性に及ぼす繊維特性の影響  
抵抗率の異なる3種類のSiC系繊維 (Tyranno<sup>®</sup>, 宇部興

産(株)、直径 $\sim 10\ \mu\text{m}$ )を長さ $\sim 2.5\ \text{mm}$ の短繊維に切断した。SiC系繊維は非化学量論組成のものであり、熱処理によって表面近傍にナノメートルオーダーの炭素に富む導電層を析出させることにより、7桁以上の範囲で抵抗率を変化させることができるものである。繊維内部に比した表面の炭素原子偏析量が50 at %となる繊維表面からの厚みを導電層の厚さ $d_c$ と定義した。本実験で用いた繊維の抵抗率の範囲は、 $6.5 \times 10^{-3}$ から $1.5 \times 10^4\ \Omega\text{m}$ である。この変化は表面のナノメートルオーダーの化学組成の変化により達成されている。マトリックスには、熱硬化性エポキシ樹脂 (エピコート 828, 油化シェルエポキシ(株))を用いた。SiC系短繊維とエポキシ樹脂を硬化剤とともに混合した後、 $\sim 1\ \text{h}$ 脱気し、373 Kで4 hの条件でエポキシ樹脂を硬化させ複合化した。繊維の体積率( $V_f$ )は、0.05から0.1の範囲とした。また、混合時間( $t_m$ )を1 $\sim$ 30 minの間で変化させ、マトリックス中の短繊維の分布状態を変化させた。

作製した複合材料から厚さ $\sim 2\ \text{mm}$ 、直径12 mmの円筒状の試料を切り出し、表面を $0.5\ \mu\text{m}$ ダイヤモンドペーストで研磨し、表面にAuを厚さ $\sim 1\ \mu\text{m}$ 蒸着した。複合材料の誘電特性は、室温で、測定試料表面に電極を接触させ、交流電圧を加えることにより複合材料の複素誘電率を測定した。測定は周波数範囲1.0 MHz $\sim$ 1.0 GHzで行った。

複合材料の電磁波吸収特性を評価するために、測定した誘電特性から複合材料中に入射した電磁波エネルギーが $-20\ \text{dB}$ 以下まで減衰する侵入深さ $D_{-20\ \text{dB}}$ をパラメータとして用いた。 $D_{-20\ \text{dB}}$ は、複合材料の誘電特性を用いて

$$D_{-20\text{dB}} = \frac{\ln 10}{\sqrt{\frac{\omega^2 \mu_0 \epsilon_0}{2} \{ \sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2} - \epsilon_r' \}}} \dots \dots \dots (1)$$

のように定義した。ここで、 $\omega$ は角周波数、 $\mu_0$ は真空の透磁率、 $\epsilon_0$ は真空の誘電率、 $\epsilon_r'$ は比誘電率、 $\epsilon_r''$ は比誘電

\*東京大学生産技術研究所 材料界面マイクロ工学研究センター  
\*\*東京大学大学院工学系研究科

## 研究速報

損率である。

## (2) 複合材料の30～40 GHzにおける電磁波吸収特性

繊維には導電層の厚さの異なる2種類のSiC系繊維を用いた。これらの繊維の抵抗率は、 $6.5 \times 10^{-3}$ および $4.5 \times 10^{-1} \Omega\text{m}$ である。マトリックスには熱可塑性ポリイミド樹脂 (AURUM PD 450, 三井化学 (株)) を用いた。繊維を平均長さ $\sim 2.5$  mmの短繊維に切断し、ポリイミド樹脂の粉末と繊維体積率が成形後に0.2となるように混合したものを出発原料とした。混合体を室温で14 MPaの加圧圧力を加えてプレス成形した後、673 Kまで加熱し673 Kで14 MPaの加圧圧力を加えてホットプレスを行い複合化した。得られた複合材料の厚さは $\sim 3$  mmである。

得られた複合材料を積層した材料の特性を測定した。ホーンアンテナから照射した電磁波を、誘電体レンズで波長の2～3倍程度に絞り込み、積層複合材料に入射させ、その透過波及び反射波を計測することにより電磁波透過特性及び反射特性を測定した。測定周波数帯域は30 GHz～40 GHzの範囲とした。測定装置の概要はすでに報告したものの [5] と同様である。

## 3. 結果および考察

## (1) 複合材料の電磁波特性に及ぼす繊維分布および繊維特性の影響

短繊維とエポキシ樹脂を混合する時間 ( $t_m$ ) を変えることにより、複合材料中の繊維の分布状態が変化した。研磨面の組織観察結果より、 $t_m = 1$  minのものは、繊維の分布が不均一であり、 $t_m = 30$  minのものではほぼ均一に混合していることが明らかになった。また、Fig. 1に示すように複合材料中の繊維の長さの分布は、混合時間  $t_m$  が長くなるにつれて繊維の平均長さ  $\bar{l}_f$  が短くなることも明らかになった。これらの結果より、混合時間 ( $t_m$ ) とともに短繊維の平均長さが短くなるとともに分散が均一になるといえる。Fig. 2は複合材料の電気抵抗率 ( $\rho_c$ ) を同一の繊維を用いた材料で測定した一例である。 $t_m = 30$  minのものは  $t_m = 1$  minのものよりも、DC  $\sim 10^7$  Hzで抵抗が大きく、短繊維の分散が均一になると電気抵抗率  $\rho_c$  が増加することがわかる。これは、繊維分散が均一になると、繊維表面同士の接触によるパーコレーション効果が減少し、表面のナノメートルオーダーの電気伝導性に寄与する層の効果がなくなるために複合材料の電気抵抗率  $\rho_c$  が大きくなるものと考えられる。

Fig. 3は繊維が均一に分布した材料における導電層の厚さ  $d_c$  と電磁波侵入深さ  $D_{-20\text{dB}}$  の関係を示したものである。周波数によらず導電層の厚さ  $d_c$  が厚い材料ほど電磁波侵入深さ  $D_{-20\text{dB}}$  が小さくなる。実験から求めた誘電特性を

用いて求めた複合材料の電磁波透過特性  $T_{\text{dB}}$ 、反射特性  $R_{\text{dB}}$  から、導電層の厚さ  $d_c$  が大きいほど電磁波の損失は大きくなり、 $d_c$  が小さいほど電磁波の表面反射特性は小さくなることが明らかになった。したがって、導電層の厚さにより、電磁波に対する複合材料の相互作用を変化させられると考えられる。

## (2) 複合材料の30～40 GHzにおける電磁波吸収特性

電磁波の入射方向に向かって、導電層が薄い (電気抵抗が大きい) 繊維を用いた材料 (厚さ3.0 mm)、導電層が厚い (電気抵抗が小さい) 繊維を用いた材料 (厚さ2.9 mm) と合わせた試料の電磁波透過特性 ( $T_{\text{dB}}$ ) 及び反射特性 ( $R_{\text{dB}}$ ) を Fig. 4に示す。導電層の異なる材料を積層させた

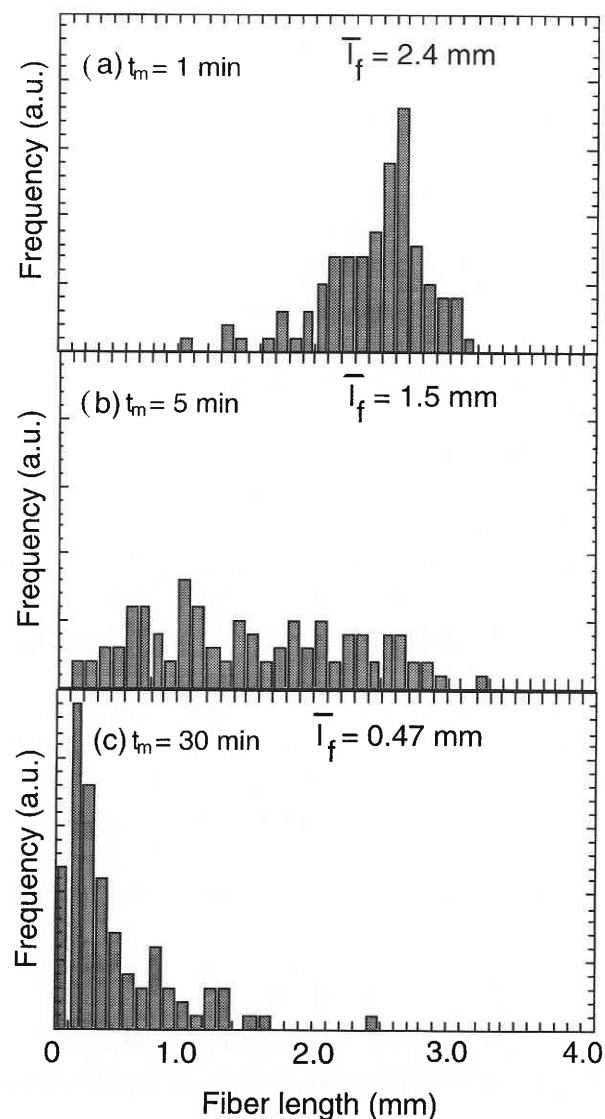


Fig. 1 複合材料中の繊維長さの混合時間による変化

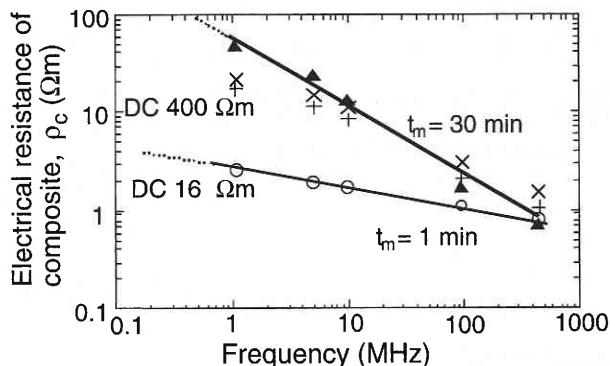


Fig. 2 複合材料の電気抵抗率に及ぼす混合時間の影響

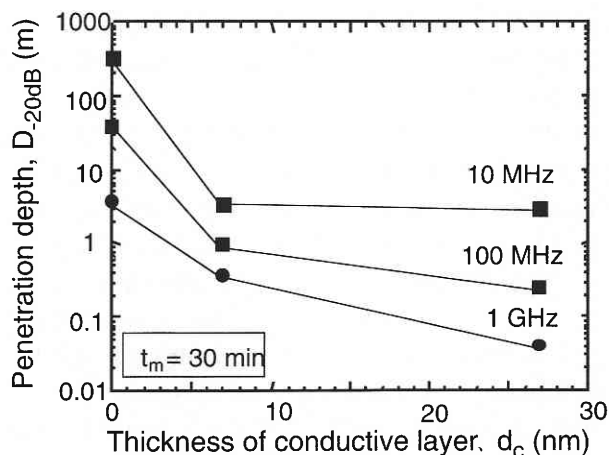


Fig. 3 ナノオーダーの導電層の厚みと電磁波侵入深さの関係

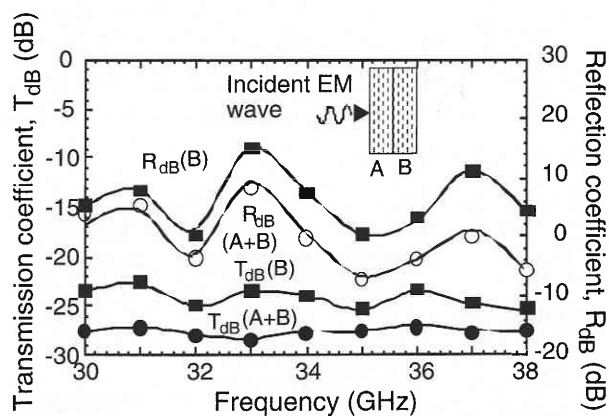


Fig. 4 積層複合材料の電磁波透過・反射特性

材料では、透過特性が  $-20$  dB 以下でありながら、導電層の厚い繊維を用いた材料単体の場合に比べ、反射特性が  $5$  dB 以上向上するという結果が得られた。この結果より、機能分担により電磁波に対して低反射・高減衰複合材料が得られることを示している。

#### 4. 結 論

直径  $10 \mu\text{m}$  前後の非化学量論組成で表面のナノメートルオーダーの組織変化により電気抵抗を変化させた SiC 系繊維を用いて、新しい薄型で GHz 帯域の電磁波吸収材料を実現する方法を検討した。

SiC 系繊維複合材料の電磁波吸収特性は SiC 系繊維の表面のナノオーダーの導電層が大きく影響しており、複合材料の導電率が小さいほど材料表面での電磁波の反射が少なくなり、導電率が大きくなるほど複合材料中の電磁波の減衰が大きくなることが明らかとなった。導電層の厚さの異なる繊維を用い、機能の異なる材料を作製し、機能を分担した材料を組み合わせることで、電磁波吸収特性に優れた複合材料の作製が可能であると考えられる。

(2001 年 8 月 6 日受理)

#### 参 考 文 献

1. M. Hatakeyama and T. Inui, "Electromagnetic Wave Absorber Using Ferrite Absorbing Material Dispersed with Short Metal Fibers," IEEE Trans. Magnetics, Vol. Mag. 20, No. 5, (1984) pp. 1261-1263.
2. 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", 電子通信学会論文誌, Vol. 68, No. 8 (1989) pp. 928-934.
3. M. B. Amin and R. J. James, "Techniques for Utilization of Hexagonal Ferrites in Radar Absorbers, Part 1: Broadband Planner Coatings," The Radio and Electronic Engineer, Vol. 51, No. 5 (1991), pp. 209-218.
4. 橋本修, 辻村彰宏, "炭素粒子混入エポキシウレタンゴムを用いた広帯域 2 層型マイクロ波用電波吸収体の理論的検討", 電子通信学会論文誌, Vol. J77 BII, No. 8 (1994) pp. 47-49.
5. 間宮崇幸, 本田絢一, 香川 豊, "SiC 繊維強化 SiC 複合材料の電磁波を利用した新しい非接触損傷検査方法", 生産研究, Vol. 52, No. 11 (2000) pp. 544-546.