

## マイクロ・ミリ波帯域の電磁波シールド用

### SiC 系繊維強化複合材料の開発

Development of SiC-base fiber-reinforced composite  
for use of electromagnetic wave shield material  
in micro/mili meter wave range

研究代表者 東京大学生産技術研究所 助手 射場久善  
Associate Researcher, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo,  
Hisayoshi IBA

Electromagnetic wave absorbing material was researched using a composite reinforced by short SiC-base fiber which electric resistance was controlled by thickness of surface carbon layer. Three kinds of SiC-base fiber with different electric resistances have been incorporated into epoxy matrix by changing the mixing time. In the frequency range of 1.0 MHz ~ 1.0 GHz, dielectric properties of the fabricated composite was measured. Electromagnetic absorbing properties of the composites depended on the thickness of carbon layer at the surface of the fiber and fiber distribution in the composite. The results was applied to a SiC-base fiber-reinforced polyimide matrix composite with two layers, which have electromagnetic absorbing and reflective properties, respectively was fabricated. The measured reflectance and transmittance less than -20 dB in the frequency range of 30~40 GHz implied that possibility of new electromagnetic wave absorbing composite materials.

#### 1. 研究目的

高度情報化社会の発達につれ、情報の伝達に広帯域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報告されるようになってきた。現状では電波をシールドするために、フェライトや炭素などの材料を利用した電波吸収体が実現されている。しかし、材料自体が重いものが多く、将来の数十 GHz 領域に対応するものが容易には得られない、などの問題点を抱えている。今後の情報化社会に対応することができる、さらに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、電磁波吸収材料としての特性を兼ね備えられていると考えられている。しかし、電磁波吸収特性についての報告はない。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 系繊維の電磁波吸収機構を解明し、新しい電磁波吸収材料を作製することを目的とした。さらに、近未来の電磁波利用に対するシールド材料の必要性および要求特性を材料開発の側面から調査研究し、新しい SiC 系繊維を用いた軽量・薄型の広帯域電磁波シールド材料の可能性を検証する。

## 2. 研究経過

### 2.1. 方法

#### (1) 複合材料の作製

抵抗率の異なる3種類のSiC系繊維(直径~10 μm)を長さ~2.5 mmの短繊維に切断した。SiC系繊維は熱処理によって表面近傍に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。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。マトリックスには、熱硬化性エポキシ樹脂を用いた。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、~1h 脱気し、373 Kで4時間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、0.050 から 0.10の範囲とした。また、混合時間を1 min ~30 minの間で変化させ、マトリックス中の短繊維分布を変化させた。

#### (2) 誘電特性の測定

作製した複合材料から厚さ~2 mm、直径12 mmの円筒状の試料を切り出し、表面を0.5 μmダイヤモンドペーストで研磨し、表面にAuを蒸着した。複合材料の誘電特性は、室温において、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~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 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導入した。 $D_{-20\text{dB}}$  は、複合材料の誘電特性を用いて

$$D_{-20\text{dB}} = \frac{\ln 10}{\sqrt{\frac{\omega^2 \mu_0 \epsilon_0}{2} \left\{ \sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2} - \epsilon_r' \right\}}}$$

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、 $\epsilon_r''$  は比誘電損率である。

#### (3) 機能分担型 SiC 系繊維電磁波吸収複合材料の製造

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を用いた。繊維を長さ~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100 vol%の密度で0.2となるように混合したものを出発原料とした。原料を室温で14 MPaの加圧圧力を加えてプレスした後、673 Kまで加熱し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~3 mmである。

#### (4) 電磁波吸収特性

異なる導電層厚さを持つSiC系繊維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30~40 GHzの範囲とした。

## 2.2 結果および考察

### (1) 複合化組織と抵抗率

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。研磨面の組織を観察することにより、 $t_m=1$  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見て取れた。また、Figure 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。すなわち、混合時間( $t_m$ )

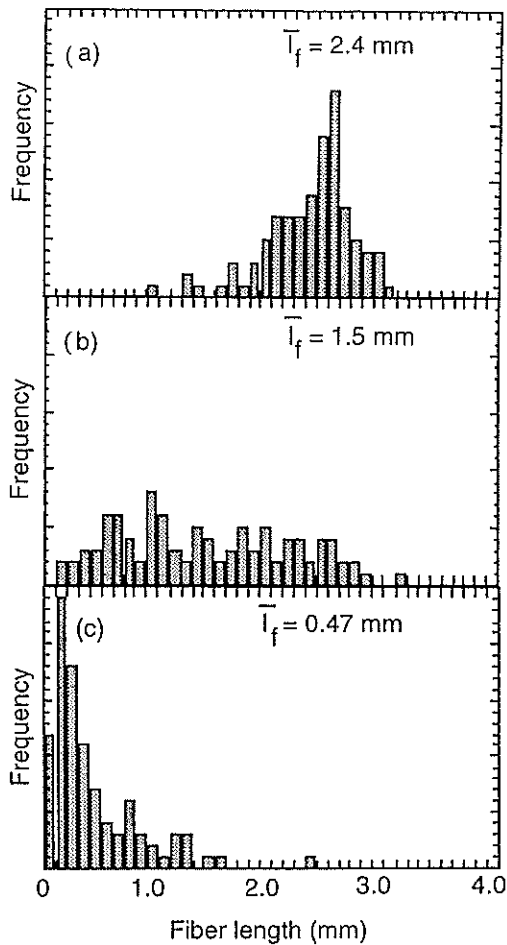


Figure 1 Effect of mixing time on fiber length in composite

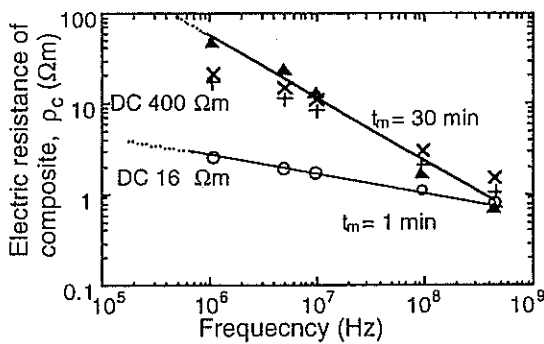


Figure 2 Effect of mixing time on electric resistance of composite

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。  
Figure 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、D.C.  $\sim 10^7$  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、繊維同士の接触によるパーコレ  
ーション効果が減少し、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。

## (2)導電層と電磁波吸収特性

Figure 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  $D_{-20dB}$  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  $D_{-20dB}$   
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  $T_{dB}$ 、反射特性  $R_{dB}$  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  
た。

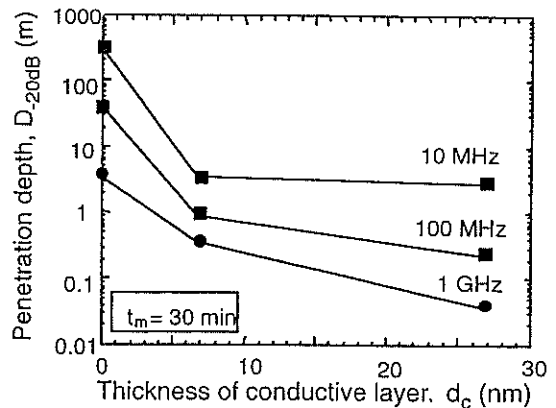


Figure 3 Penetration depth versus thickness of conductive layer

### (3) 機能分担による SiC 系繊維電磁波吸収複合材料の実現

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( $T_{dB}$ )及び反射特性( $R_{dB}$ )を Figure 4 に示す。導電層の異なる材料を積層させた材料では、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くらべ、反射特性が 10 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がわかる。

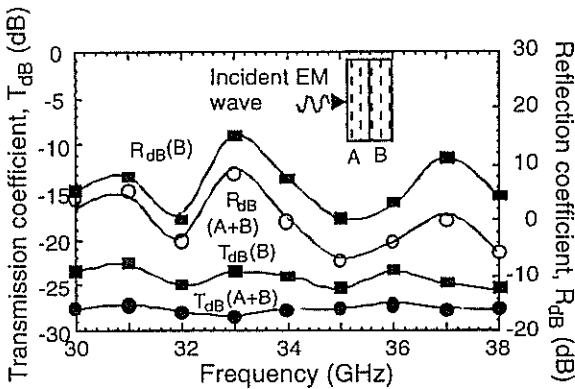


Figure 4 Transmission and reflection coefficient of layered composite

#### 2.3 まとめ

直径 10  $\mu\text{m}$  前後の 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で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ことが明らかとなった。

### 3. 研究成果

導電率の異なる SiC 系繊維を用いて、機能を分担した材料を組み合わせることで、薄型で GHz 帯域で電磁波吸収特性に優れた新しい電磁波吸収複合材料の作製が可能であることを示すことができた。

### 4. 今後の課題と発展

電波吸収体は今後の電波利用技術を実現するための鍵となる材料であるが、それを構成する材料自体についての材料学的な視点からの研究・開発が遅れている分野である。また、欧米の研究発表が防衛にかかわるために公式な発表が行われない状況を考えると、今後の IT 技術や ITS 技術を成功させるためには、我が国で独自の技術開発が必要な分野でもあるともいえる。本研究で用いた SiC 系繊維は力学的特性にも優れており、「電波吸収」+「構造材料」という両者を兼ね備えた繊維強化プラスチックで新しい電磁波吸収体を得ることが可能である。SiC 系繊維を用いた電波吸収材料の設計方法の確立および最適な製造方法に対してさらに詳細な検討を行う必要がある。

### 5. 発表論文リスト

- ・電波吸収 SiTiCO 繊維複合材料の特性評価：今橋祐輔、本田紘一、香川豊、佐藤光彦、石川敏弘、山村武民・日本金属学会 2000 年(第 127 回)大会講演予稿集、P.474、日本金属学会、2000 年 10 月
- ・Electromagnetic properties of SiTiCO fiber-reinforced composite, Y. Imahashi, H. Iba and Y. Kagawa (投稿準備中)