

# カーボンナノチューブ産業への応用可能性研究（Ⅱ）

黒川 悟<sup>\*1</sup>  
佐藤 亨<sup>\*2</sup>  
吉門 進三<sup>\*3</sup>  
岩本 信也<sup>\*4</sup>  
相馬 勲<sup>\*5</sup>  
加藤 英樹<sup>\*6</sup>

## 【要 旨】

カーボンナノチューブは、その構造により、誘電体、導電体、半導体の性質を示すことが知られており、様々な分野への応用が期待され、実用を目指した研究開発が盛んである。そこで我々は、カーボンナノチューブのミリ波帯域並びにマイクロ波帯での応用可能性評価として、ミリ波帯域での電波遮断・吸収特性評価、マイクロ波帯域での各種電気特性の評価を試みた。その結果、カーボンナノチューブを配合したプラスチック材料がカーボンナノチューブの配合量が10～20重量%の場合、ミリ波帯域では70dB以上の電波遮断効果を示し、また、マイクロ波帯域ではポリカーボネートに3重量%のカーボンナノチューブを混入した材料の場合、10GHz近辺で10dB以上の吸収効果を有することを確認した。

## 1 はじめに

近年のIT技術の進展、情報量の増大は目覚しく、高速通信を実現するため、用いる周波数もマイクロ波帯からミリ波帯へと高い周波数での利用が望まれている。また、これらミリ波帯域無線を用いたアプリケーションについては、自動車衝突防止レーダ、鉄道の事故監視、ミリ波無線LAN等様々な研究開発が実施されている。これに伴い、様々な機器への障害、電波干渉等も懸念されてお

り、ミリ波帯域での電波遮断材料の開発も盛んに行われている。

一方カーボンナノチューブは、その構造により、誘電体、導電体、半導体の性質を示すことが知られており、様々な分野への応用が期待され、実用を目指した研究開発が盛んである。

そこで我々は、カーボンナノチューブのミリ波帯域で利用の盛んな50GHz～75GHz（以下Vバンドと記す）での電波遮断・吸収材料としての応用可能性、並びにマイクロ波帯（100MHz～10GHz）での電波吸収材料としての応用可能性を評価することを試みた。その結果、カーボンナノチューブを配合したプラスチック材料がカーボンナノチューブの配合量が10～20重量%の場合、70dB以上の電波遮断効果を示す結果を得ていることから今後の応用が期待できる。

- 
- \* 1 研究開発課 主任
  - \* 2 京都大学大学院情報学研究科 教授
  - \* 3 同志社大学工学部 教授
  - \* 4 大阪大学名誉教授
  - \* 5 ㈱けいはんな科学技術コーディネータ
  - \* 6 ハイペリオン・キャタリス・インターナショナル・インク

## 2 ミリ波帯域での電波遮断特性評価

### 2. 1 導波管プローブを用いた板状材料電波遮断特性評価手法の概要

カーボンナノチューブ配合プラスチック材料の電波遮断特性測定に用いる板状材料電波遮断特性評価手法の概要を述べる。

ミリ波帯域での各種材料の電波遮断特性評価手法としては、対向して配置した2本のホーンアンテナによりネットワークアナライザを用いて評価する手法が広く知られているが、ホーンアンテナの放射パターン特性のため、評価に必要な材料はホーンアンテナの物理的な開口面積よりも比較的大きな資料が必要である。

しかし、電波遮断特性を評価するカーボンナノチューブ配合プラスチック材料は、10cm角以上の資料を作成することが困難であったため、ミリ波帯域でのアンテナ放射パターン測定法である、近傍界平面スキャン測定法に用いられる導波管プローブ2本を用いる測定法を用いた。本手法は、2本の導波管プローブの1本を送信、もう1本を受信用アンテナとして用い、測定周波数の3波長以上の距離を隔てて配置する。被測定材料は、送信アンテナから1波長以上隔てた位置にアンテナに垂直に厚さ3mmのテフロン板の上に配置し、その材料を透過する電波のレベルのみをネットワークア

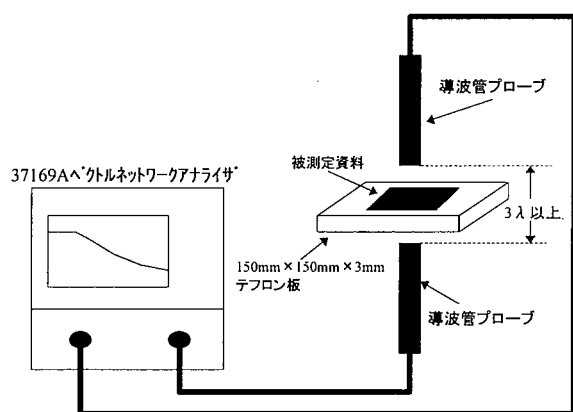


図1 測定の概念図

ナライザのタイムドメインゲーティング機能を用いて分離し評価する方法を用いた。評価手法の概念図を図1に示す。

なお、ネットワークアナライザはアンリツ社製37169Aベクトルネットワークアナライザ・ミリ波テストセットを測定プローブ位置決め装置としては東海テクノ社製アンテナ近傍界測定装置を用いている。

### 2. 2 カーボンナノチューブ配合プラスチック材料の概要

前節に示した測定法により、以下に示す、大きさ90mm×45mm、材料厚み $t = 3\text{mm}$ の10種のカーボンナノチューブ配合プラスチックを用いた板状材料の電波遮断特性を測定した。

なお、各プラスチック材料へのカーボンナノチューブ配合量は、材料作成上の理由により決定したものである。

- (1) ポリスチレンに10wt%カーボンナノチューブを配合した材料。(図中P S (10wt%、 $t = 3\text{mm}$ )と記す。)
- (2) ポリスチレンに15wt%カーボンナノチューブを配合した材料。(図中P S (15wt%、 $t = 3\text{mm}$ )と記す。)
- (3) ポリスチレンに20wt%カーボンナノチューブを配合した材料。(図中P S (20wt%、 $t = 3\text{mm}$ )と記す。)
- (4) P E Tに4 wt%カーボンナノチューブを配合した試料。(図中P E T 4%と記す)
- (5) P E Tに5 wt%カーボンナノチューブを配合した試料。(図中P E T 5%と記す)
- (6) P E Tに6 wt%カーボンナノチューブを配合した試料。(図中P E T 6%と記す)
- (7) PEEK (ポリエーテルエーテルケトン)に5 wt%カーボンナノチューブを配合した試料。

(図中 PEEK 5%と記す)

- (8) PEEKに7wt%カーボンナノチューブを配合した試料。(図中 PEEK 7%と記す)
- (9) PC (ポリカーボネート) に3wt%カーボンナノチューブを配合した試料。(図中 PC 3%と記す)
- (10) PCに5wt%カーボンナノチューブを配合した試料。(図中 PC 5%と記す)

## 2.2 カーボンナノチューブ配合プラスチック材料のミリ波帯域での電波遮断特性測定結果

### 2.2.1 電波遮断効果算出法

まず、前節で述べた測定配置により、ネットワークアナライザのタイムドメイン機能を用いて測定した結果を図2に示す。資料台として用いる  $t = 3\text{mm}$  のテフロン板のみの場合の結果から、材料を直接透過する電波は  $\pm 100\text{ps}$  の範囲内で観測されることがわかる。被測定資料を配置した結果では、材料の比誘電率により  $50\text{ps}$  程度の伝播遅延が発生し、 $-100\text{ps} \sim +150\text{ps}$  に材料を直接透過する電波が到来している。このため、この直接透過する電波のみをネットワークアナライザのタイムゲート機能を用いて切り出し、電波遮断効果とすることとした。なお、それ以後に到達する波は資料端からの回折波である。

### 2.2.2 電波遮断特性測定結果

まず、図2に資料(1)~(3)のタイムドメイン測定結果を示す。測定結果は、カーボンナノチューブ配合比10wt%の場合、直接透過波がピーク値で  $-65\text{dB}$ 、配合比が15wt%、20wt%の場合で  $-100\text{dB}$  程度であることがわかる。また、資料端からの回折波は、 $100\text{ps}$  以後に  $-80\text{dB}$  程度のレベルで到来していることがわかる。

図3にポリスチレンにカーボンナノチューブを10wt%以上配合した資料(1)~(3)の電波遮断特性測定結果を示す。

測定結果は、カーボンナノチューブの配合比10wt%の場合  $65\text{dB}$ 、配合比が15wt%、20wt%の場合  $100\text{dB}$  程度の電波遮断効果を有していることを示す結果となり、配合比を10wt%から15wt%に増加させることで、 $30\text{dB}$  以上電波遮断効果が向上していることがわかる。

図4にポリスチレン以外のプラスチック材料にカーボンナノチューブを7wt%以下の量を配合した資料(4)~(10)の電波遮断特性測定結果を示す。

PET、PC、PEEKを用いた試料の場合については、カーボンナノチューブの配合量が多いほど電波遮断効果が高いという結果となった。

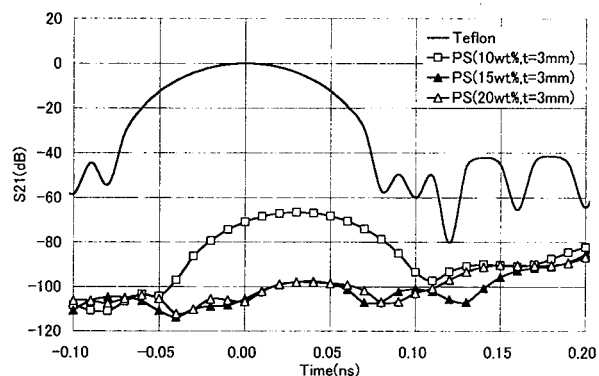


図2 資料(1)~(3)タイムドメイン測定結果

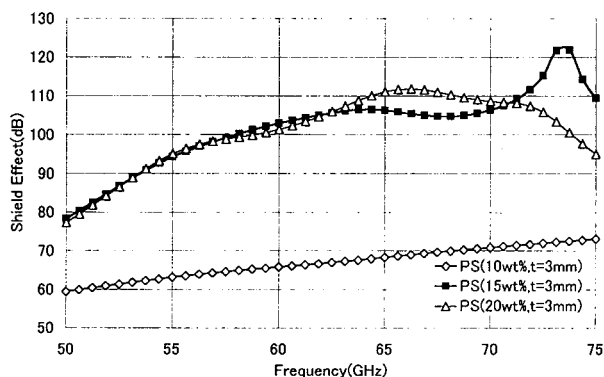


図3 資料(1)~(3)電波遮断効果

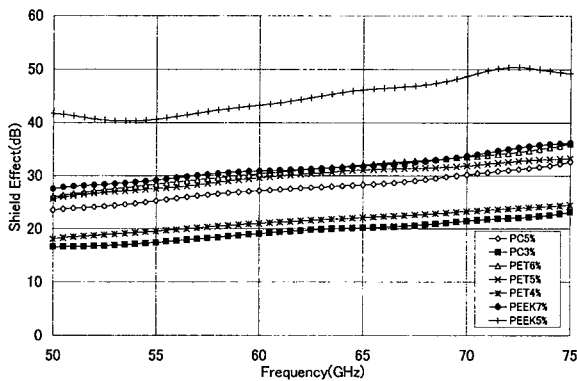


図4 カーボンナノチューブ配合各種プラスチック材料の電波遮断特性

### 3 垂直入射による電波吸収特性評価

ホーンアンテナから放射する電波を金属板に貼り付けた試料に垂直に入射し、その反射波のレベルと金属のみの場合のレベルとの差を電波吸収効果として評価する。評価結果を図5に示す。

PET、PC、PEEKを用いた試料の場合、カーボンナノチューブの配合量が少ないほど電波吸収効果が高いという結果となった。

最も電波吸収効果の低い試料はPSに20wt%カーボンナノチューブを配合した資料であり、概ね2dB程度の効果となった。

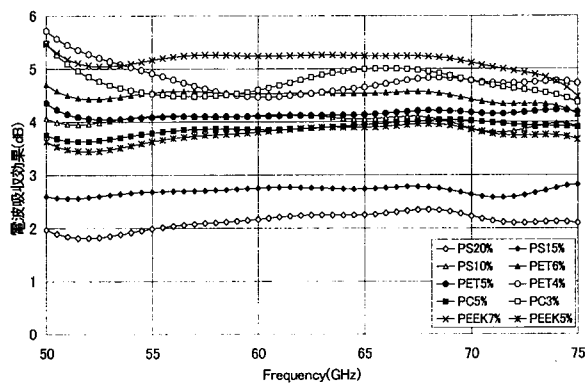


図5 カーボンナノチューブ配合各種プラスチック材料の電波吸収特性

## 4 マイクロ波帯域での各種特性評価

### 4.1 各種電気的特性評価

カーボンナノチューブ配合プラスチック材料の特性評価として、10GHz程度以下の周波数での各種電気特性を評価する。

測定は、ネットワークアナライザにより、APC7mm規格の同軸コネクタの同軸状に加工した被測定材料を挿入し、 $S_{11}$ 、 $S_{21}$ の2つのSパラメータを測定することにより複素誘電率、複素透磁率、導電率を求める方法<sup>[3]</sup>によりおこなった。測定結果を図6に示す。

複素誘電率の実数部の測定結果では、PEEK材の物が非常に大きな誘電率を示しており、100MHz近辺で1000F/mを示している。100MHz近辺で最も小さな値を示しているPCに3wt%カーボンナノチューブを配合した材料でも150F/m程度の値を示している。複素誘電率の虚数部の測定結果は、カーボンナノチューブの配合量が多いほど大きな値を示す結果となった。これは、図6-3に示す導電率がカーボンナノチューブの配合量が多いほど大きな値となることが原因と考えることができる。

比透磁率の測定結果を図6-4に示す。測定結果では、PS15wt%、PS20wt%の場合1GHz~2GHzで比透磁率が2前後となり、また、PEEK7wt%では、3GHz程度から比透磁率が増加し11GHz程度でピークとなり2.3程度を示している。他の材料についても6GHz以上の周波数で1を超える比透磁率を示す結果となった。

これらの結果は、プラスチック材料に混入するカーボンナノチューブの配合量を調整することにより、導電率、誘電率、透磁率の調整が可能であることを示している。

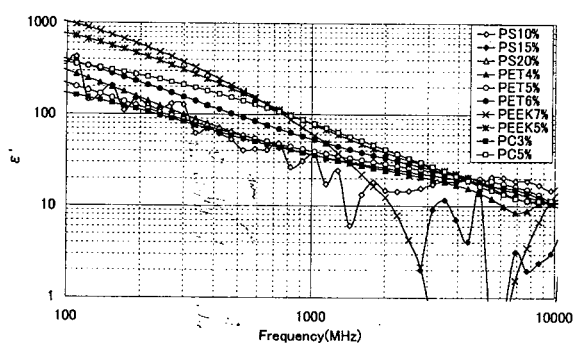


図6-1 複素比誘電率の実数部測定結果

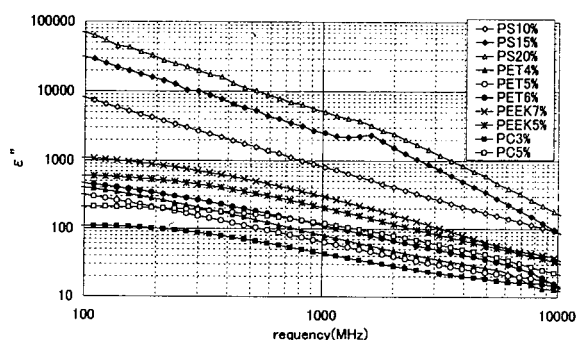


図6-2 複素比誘電率の虚数部測定結果

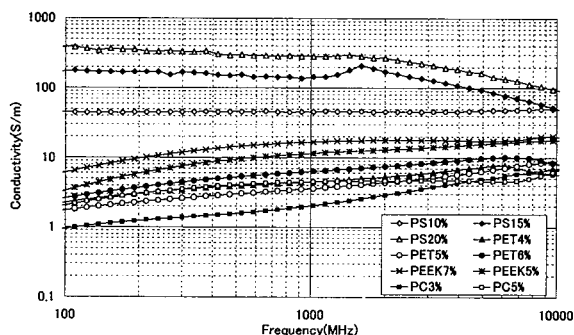


図6-3 導電率測定結果

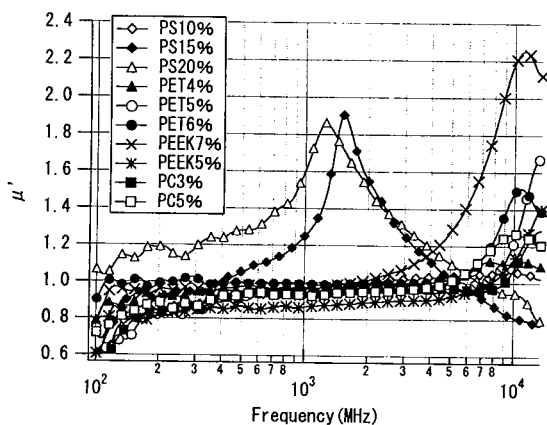


図6-4 複素比透磁率の実数部の周波数特性

## 4. 2 電波吸収特性評価

測定した複素誘電率、透磁率から、材料の厚みによる垂直入射時の電波吸収特性を算出し、リターンロス値として評価した。リターンロス値が小さいほど高い吸収効果を有していることを示している。電波吸収特性を図7に示す。

材料厚 3 mm の場合の結果は、PC 3 wt% 試料が 6 GHz で 6 dB 以上の吸収ピークを有する特性を持ち、最も吸収効果が高いことがわかった。また、材料厚 8 mm の場合の結果は、PC 3 wt% 試料が 1.8 GHz 近辺で 4 dB 以上のピークを有する吸収特性を持ち、4 GHz 以下で最も吸収効果が高いことがわかった。

2 種の材料厚みで最も電波吸収効果の高い PC 3 wt% 試料について、材料厚みをパラメータとして吸収効果の周波数特性を算出した図7-3の結果では、材料厚みを薄くすることで、吸収のピーク周波数が高周波域にシフトし、1.5 mm 厚では 10 dB 以上の吸収効果を有することがわかった。1 mm 厚手の結果は今回測定した周波数以上で吸収のピークを有すると考えられるが、今後測定を実施することとする。

これらの結果は、カーボンナノチューブ配合プラスチック材料が配合するカーボンナノチューブ量を制御することにより、狭帯域電波吸収体としての利用可能性を示す結果となった。

## 5 成果及び可能性評価

本研究では、カーボンナノチューブ配合各種プラスチック材料の産業への応用可能性を検討することを目的として、カーボンナノチューブ配合プラスチック材料のミリ波帯域での電波遮断・吸収特性評価、マイクロ波帯域での各種電気特性、電波吸収特性評価を実施した。

その結果、カーボンナノチューブの配合量が 10

～20重量%の場合、ミリ波帯域では70dB以上の電波遮断効果を示すことを確認した。また、マイクロ波帯の測定結果では、プラスチックへの配合率と、用いるプラスチック材料を選択することにより、導電率を制御することが可能であること、これにより材料を電波遮断材料、狭帯域の電波吸収材料とすることが可能であることを示すことができた。

本研究では、カーボン材料として Hyperion Catalysys 社製カーボンナノチューブのみを用いた評価のみを実施したが、今後は各種カーボン材料を用いた場合の結果との比較を実施し、カーボンナノチューブの産業応用可能性を検討することとしたい。

## 6 謝 辞

マイクロ波帯域の測定に際して資料作成などに御協力いただいた同志社大学工学部吉門研究室楠氏、資料を作成していただきました大塚化学谷清澄氏、竹中稔氏に感謝いたします。

なお本研究は、文部科学省地域研究開発促進拠点支援事業（RSP事業）可能性試験として実施しています。

## 6 参考文献

- [1] 黒川悟、佐藤亨、“ホーンアンテナと導波管を用いた電波遮断特性測定法の検討とそれを用いたカーボンナノチューブ配合プラスチックの電波遮断特性評価”、電気学会研究会資料電磁理論研究会、EMT-01-58 (2001-6)
- [2] 黒川悟、相馬勲、加藤英樹、“カーボンナノチューブ配合プラスチックの電磁波シールド特性”、第9回フィラーシンポジウム、

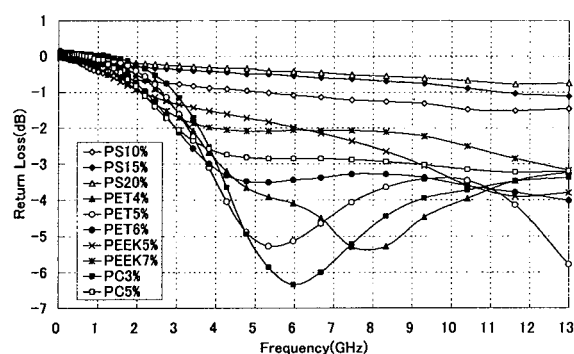


図7-1 試料厚み 3 mm の場合の電波吸収特性

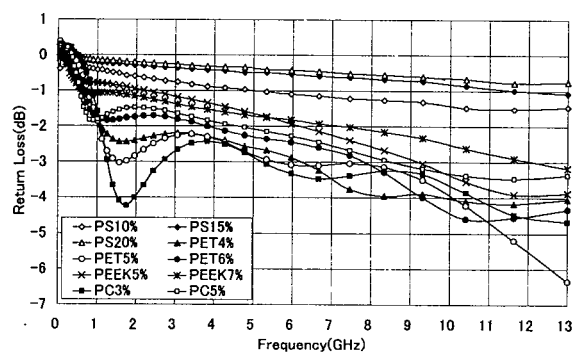


図7-2 試料厚み 8 mm の場合の電波吸収特性

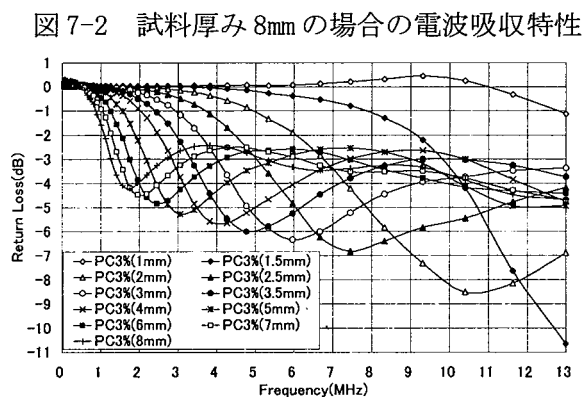


図7-3 PC 3 wt% 試料の厚みによる電波吸収特性の変化

2001.11.16

- [3] 楠祐樹、近藤隆俊、吉門進三、“フェライト・SiO<sub>2</sub>複合電波吸収材料の吸収特性の改善および斜入射特性の評価”、電気学会論文誌、Vol. 122-A、No. 5、May、2002