

## ミリ波帯における紙および塗料型電波吸収体の研究

代表研究者 橋本 修 青山学院大学理工学部電気電子工学科教授  
 共同研究者 清水 康敬 東工大教育工学開発センター教授  
 共同研究者 荒木 純道 東工大情報工学科教授

### 1 目的

現在、ミリ波帯の電波利用に関する研究が各方面で活発に行われている。特に、60GHz帯および76GHz帯での利用研究は急速に進められており、自動車レーダ、室内LAN等への利用が期待されている。このような高度な電波利用により懸念される電磁波障害の防止に対して電波吸収体は有効な手段となる。

そこで本研究では、まず、(1)母材として耐候性を考慮してエポキシ樹脂を、充填剤には複素比誘電率が大きな材料である酸化チタンとカーボン粒子を採用し、垂直入射用の塗料型ミリ波電波吸収体について検討し、つぎに、(2)抵抗膜より安価でしかも取り扱いの簡単な紙に導電性塗料を塗った導電紙を用い、ミリ波吸収体を実現する基礎的検討として、X帯やKu帯において、4型電波吸収体を設計・製作し、吸収特性を測定することにより、紙を用いた電波吸収体の実用的な設計法を示した。以下、その詳細について説明する。

### 2 塗料型電波吸収体

#### 2.1 吸収体の設計

図1に示す金属裏打ちした1層構成の電波吸収体では、その等価回路から吸収性能Sは次式で求まる。

$$S[dB] = -20 \log_{10} \left| \frac{\dot{Z}_r - 1}{\dot{Z}_r + 1} \right| \quad (1)$$

ここで、 $\dot{Z}_r$ は規格化インピーダンスであり、

$$\dot{Z}_r = \sqrt{\frac{\dot{\mu}_r}{\dot{\epsilon}_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_r \dot{\mu}_r}\right) \quad (2)$$

と表される。ここで、 $\lambda$ は波長、 $d$ は試料厚さ、 $\dot{\mu}_r$ は複素比透磁率、及び $\dot{\epsilon}_r$ は複素比誘電率 ( $\dot{\epsilon}_r = \epsilon_r - j \epsilon_r''$ ) である。さらに、磁性体を使用しない1層型電波吸収体では $\dot{\mu}_r = 1$ であるから、電波が垂直入射する場合の無反射条件は、次の式で表わされる。

$$\frac{1}{\sqrt{\dot{\epsilon}_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_r}\right) = 1 \quad (3)$$

従って、式(3)を解けば、材料に求められる複素比誘電率と試料厚さの関係を算出することができ、さらにその場合の吸収量がどのような特性を示すかは式(1)を用いて確認できる。

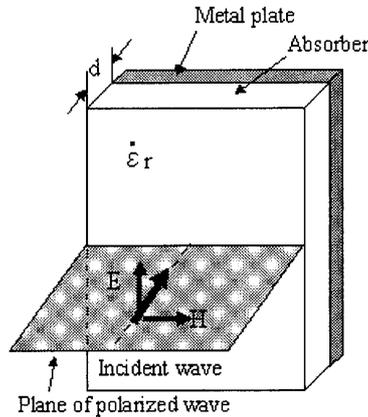


図1 電波吸収体の構成と入射波

## 2.2 複素比誘電率

### 2.2.1 測定試料

エポキシ樹脂に対し酸化チタン及び炭素粒子を添加し攪拌後、容器に注型、硬化することにより表1に示すように6種類の試料を製作した。ここで、複素比誘電率測定用の試料寸法は、150mm×150mm×2mmであり、測定値のばらつきを検討するために、各配合について3枚製作した。そして、これらの試料の複素比誘電率をVHS社製フリースペース誘電率測定装置により50～110GHzにおいて測定した。本装置は、自由空間法で複素比誘電率を測定する方法であり、ベクトルネットワークアナライザを用いて試料の透過率を位相も含めて測定した結果から複素比誘電率を最小二乗法を用いて逆推定問題として複素比誘電率を算出するものである。

### 2.2.2 測定結果

図2に式(3)を解いて得られる無反射曲線の内、1次と2次の曲線とともに、複素比誘電率の測定結果の平均値を周波数ごとにプロットして示す。この図において、無反射曲線上に複素比誘電率の測定値が存在する材料を使用すれば、理想的な電波吸収体が得られる。この結果、図2から次のことがわかる。

すなわち、(1)酸化チタンの添加量が増えるに従って、複素比誘電率の実部及び虚部ともに増加する。(2)表1に示したように、試料番号3、4、5は酸化チタンの添加量を20phrと一定にして、炭素粒子の添加量を変化させたものである。これらと比較すると、炭素粒子の添加量を増加させるに従って、複素比誘電率の実部、虚部共に大きくなるが、その割合は、特に実部の方が大きいことがわかる。以上の結果から、酸化チタンおよび炭素粒子の添加量を最適に選ぶことにより、無反射条件を満足する複素比誘電率を実現することができる。

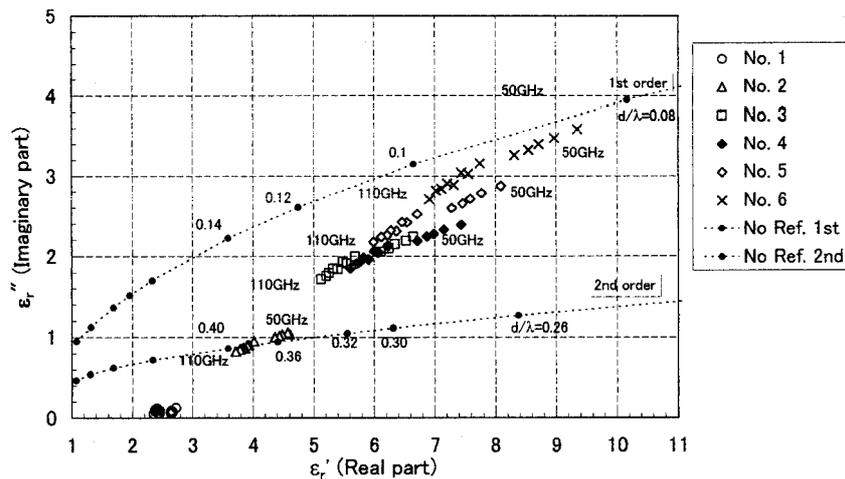


図2 複素比誘電率の測定結果

表1 充填剤の添加量

配合 No.	酸化チタン (phr)	カーボン (phr)
1	0	0
2	10	0
3	20	0
4	20	1
5	20	2
6	30	1

### 2.2.3 実験式

炭素粒子をゴム等の誘電体に添加して複素比誘電率を調節する場合、複素比誘電率は、一般に炭素粒子濃度および周波数の指数関数で表されることが分かっている。そこで、酸化チタンと炭素粒子を合わせて添加する場合も同様に考え、複素比誘電率は充填剤量の指数関数で表されるとした。このとき、酸化チタンと炭素粒子の添加量は、複素比誘電率に独立に寄与するとし、さらに、考慮すべき周波数範囲が50~110GHzと広範囲なので、定数項も周波数依存性があるとした。すなわち、複素比誘電率 ( $\epsilon_r = \epsilon' - j \epsilon''$ ) の実験式は、

$$\begin{aligned} \epsilon' &= a' f^{b'} + d' G^{e'} f^{h'} + k' C^{l'} f^{m'} \\ \epsilon'' &= a'' f^{b''} + d'' G^{e''} f^{h''} + k'' C^{l''} f^{m''} \end{aligned} \quad (4)$$

で表されると仮定した。ここで、 $f$ は周波数(GHz)、 $G$ は酸化チタン添加量(phr)および、 $C$ は炭素粒子添加量(phr)である。また、 $a \sim m$ は決定すべき定数項である。

このような仮定のもとで、2.2.2項に示した複素比誘電率の測定結果に最小二乗法を適用し、それぞれの係数を求めると、実験式は、

$$\begin{aligned} \epsilon' &= 5.86 f^{-0.19} + 1.25 G^{1.02} f^{-0.49} + 4.92 C^{1.19} f^{-0.54} \\ \epsilon'' &= 0.21 f^{-0.24} + 0.29 G^{1.12} f^{-0.34} + 0.38 C^{2.56} f^{-0.34} \end{aligned} \quad (5)$$

となり、この式を無反射曲線を表す式(3)に代入して解けば、電波吸収体が設計できる。

## 2.3 電波吸収性能

### 2.3.1 設計結果

上記2.2.2項(2)に示したように、炭素粒子の添加量が多いほど薄い吸収体を実現できると考えられるが、炭素粒子の添加により粘度が増大し、塗布することが難しくなることが知られている。そこで、本研究では、塗料型吸収体としての実現性を考慮し、カーボン粉末の添加量は、1phrとした。この条件で60GHzにおいて式(3)、(5)を解くと、複素比誘電率が無反射曲線上にある酸化チタンの添加量として32phrが得られる。上記の検討結果を確認するため、酸化チタン量を32phr、炭素粒子量を1phrとして新たに製作した試料の複素比誘電率を測定した結果を1次の無反射曲線および20dBの吸収性能を示す境界線とともに図3に示す。この図からわかるように、この試料の複素比誘電率はほぼ無反射曲線上にあり、しかも複素比誘電率が周波数とともに、ほぼ無反射曲線と平行に変化しており、20dB以上の吸収性能を示す領域内にあることが観察された。従って、配合を変化させずに厚さを変更するだけで50~110GHzにおける任意の周波数に対応した電波吸収体の製作可能性が示された。

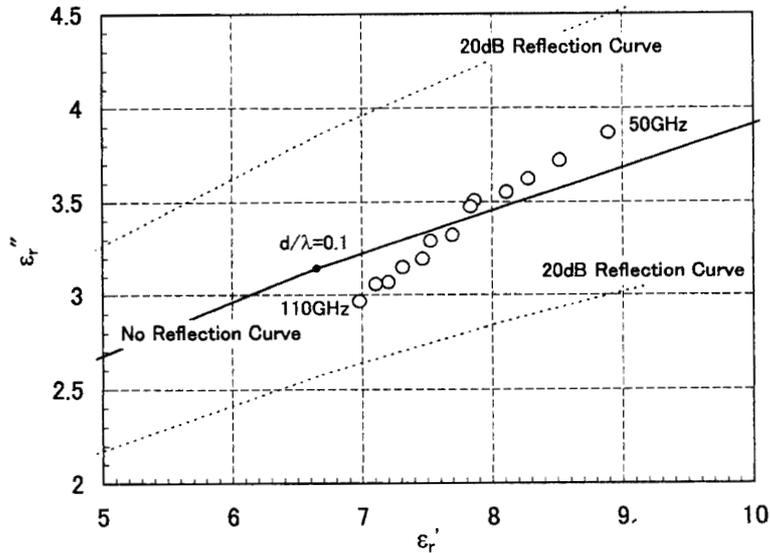


図3 複素比誘電率の測定結果

### 2.3.2 測定試料

製作工程の概略を図4に示す。この図に示すように、エポキシ樹脂に酸化チタン32phrおよび炭素粒子1phrを添加し、攪拌後アルミ板（JIS A5052）上に塗布し、乾燥、硬化後塗装表面を研磨することにより、厚さが均一になるよう調整した。このような方法により8種類の厚さの異なる試料を製作した。

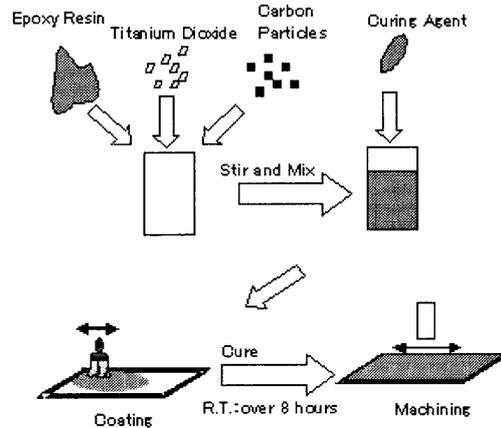


図4 電波吸収体の製作工程

### 2.3.3 測定結果

図5に50～110GHzにおける試料の吸収性能の測定結果を示す。ここで、試料の厚さは、試料7-1から7-8の順に、0.28mm、0.31mm、0.35mm、0.40mm、0.40mm、0.43mm、0.46mm、0.48mm、であり、渦電流式厚さ測定器((株)キーエンス社製EX-510)で9ヶ所の厚さを測定した値の平均値である。図3に示されるように、本材料の複素比誘電率は、80GHz付近で無反射曲線上にあり、他の周波数では、無反射曲線から離れていく。従って、80GHz付近で整合させた試料が、最も高い吸収性能を示すはずであるが、実際には、製作段階において、試料にわずかながら複素比誘電率の差異が存在する。このため、吸収性能の最大値と整合周波数との間には一定の傾向は見られなかったが、各試料とも23dBを超える吸収性能が得られ良好な電波吸収体の実現できることがわかる。

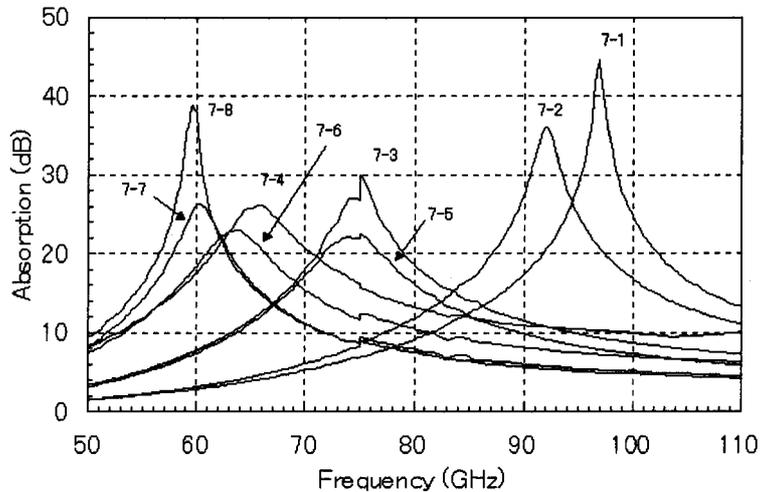


図5 吸収性能の測定結果

### 3 導電紙電波吸収体

#### 3.1 導電紙の製作法

図6は本研究で用いた導電紙の製作法を示している。この図に示すように導電紙は、(1)塗工量を調整部の間隔によって調整し、導電性塗料の量を一定とした後、(2)繰出し部より出された紙にローラーで塗料を均一に塗り、(3)これを乾燥させることにより製作される。本研究では、紙として王子製紙(株)製メラミンクルパック73を、また導電性塗料として日本黒鉛工業(株)製パニーハイトC-812を使用した。

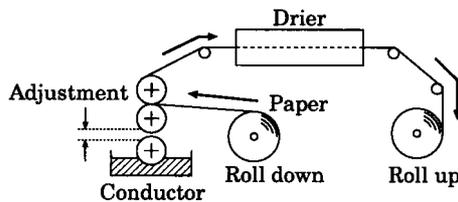


図6 導電紙の製作法

#### 3.2 簡易設計と試料製作

図7は以上の方法により製作された導電紙を用いて簡易設計(後述する導電紙の誘電率を考慮しない設計)した電波吸収体の構成図である。この図に示すように、電波の入射側より、保護層として発泡スチロール ( $\epsilon_r \approx 1$ ) を、吸収膜としては導電紙を、スペーサとして、保護層と同様に発泡スチロールを用い、終端を金属板で短絡した。このような構成において、整合周波数( $f_0$ )を  $f_c=15\text{GHz}$  と選択し、酸化インジュームの抵抗皮膜を用いた場合と同様に、導電紙の厚みを無視し、さらにその比誘電率を  $\epsilon_r=1$  と仮定して、 $\lambda/4$ 型電波吸収体を設計した。

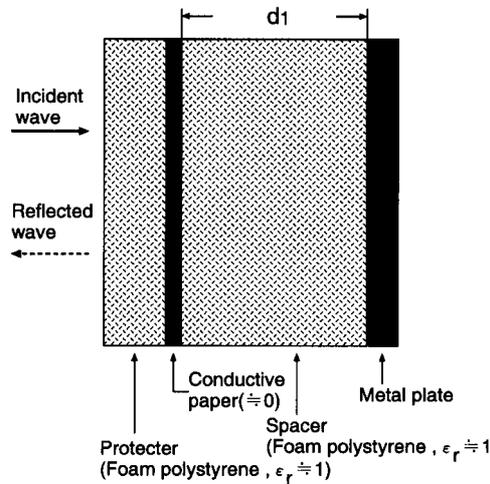


図7 簡易設計に用いた電波吸収体の構成図

ここで示す簡易型  $\lambda/4$ 型電波吸収体においては、スペーサの特性インピーダンス $\dot{Z}_c$ 、伝搬定数 $\dot{\gamma}_c$ 、厚み $d_1$ とおくと、吸収体表面から内部を見込んだ入力インピーダンス $\dot{Z}_{in}$ は、次式のようになり、この $\dot{Z}_{in}$ を用いて吸収量を求めることができる。

$$\dot{Z}_{in} = \frac{r_1 \cdot \dot{Z}_c \tanh \dot{\gamma}_c d_1}{r_1 + \dot{Z}_c \tanh \dot{\gamma}_c d_1} \quad (6)$$

$$(7)$$

ここで、 $r_1$ は吸収膜の面抵抗値である。そして、スペーサの厚み $d_1$ および吸収膜の面抵抗値 $r_1$ を変化させて、吸収量が最大になるように電波吸収体の設計を行なった結果、スペーサが空気と近似できる発泡スチロールであることを考慮すると、通常の  $\lambda/4$ 型電波吸収体のように導電紙の面抵抗値は $376.7 \Omega$ 、スペーサの厚さは $5.0\text{mm}$  ( $\lambda/4$ )となった。

本研究ではこの設計諸元を満足するもののほかに、ここで用いた紙自体の厚みと比誘電率を考慮した、より実用的な設計を行なうための基礎データを得ることも含め、面抵抗値の異なる10枚の試料を製作し、三菱化学(株)製Loresta MPを用いた四端子法により、各試料において周囲8箇所の面抵抗値の測定を行った。その結果を表2に示す。

表2 導電紙の面抵抗値 (単位 [ $\Omega$ ])

302 ±15	305 ±35	337 ±15	351 ±28	374 ±20
374 ±17	544 ±19	577 ±38	595 ±42	633 ±33

### 3.3 吸収特性の測定結果

以上の測定試料に対して入射電界が塗料の塗り方向に対して垂直になる場合と水平になる場合それぞれにおいて測定した吸収量の結果の一例を図8に示す。ここで、これらの図は、電界に対して塗料の塗り方向が垂直な場合と、水平な場合を示しており、直線は設計値、破線は測定値を表している。また、測定された面抵抗値はともに同じ値( $374 \Omega$ )の場合を示している。

この測定結果より、設計値に対し整合周波数が4GHz程度と大きくずれていること、また、垂直と水平の場合を比較すると四端子法における面抵抗値の測定結果が同一の試料においても、ピーク周波数における吸収量は大きく変化しており、導電性塗料の塗り方によって導電紙に方向性が生じていることが分かった。

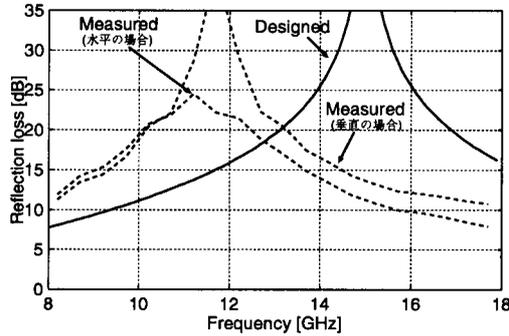
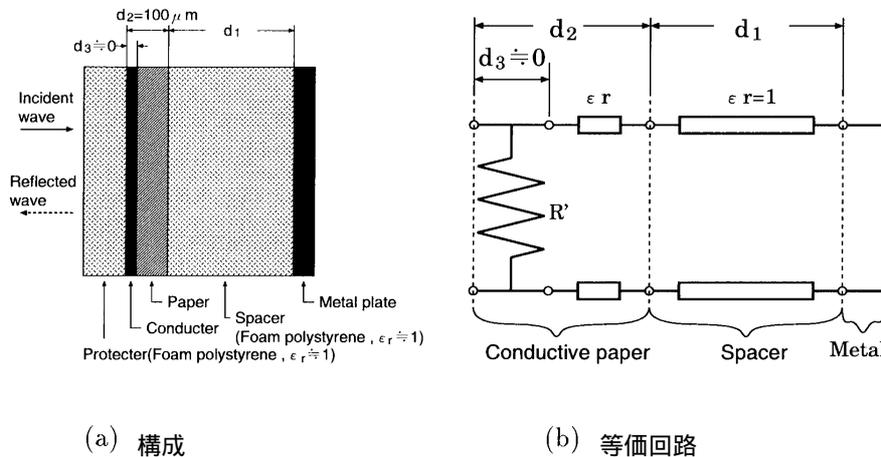


図8 吸収量の測定結果

### 3.4 実験式

以上の測定結果から本吸収体は、高い吸収量を得ることができるもの整合周波数には大きなずれが確認された。そこで、新たに図9に示すように導電紙の厚み $d_2$ と比誘電率 $\epsilon_r$ を考慮して $\lambda/4$ 型電波吸収体の等価回路を提案し検討を行なった。なお、導電紙の厚みは実測した結果から $d_2=100\mu\text{m}$ とした。

さて、このような等価回路においては、導電紙を製作する際に塗り筋の影響があるため、四端子法により測定される測定面抵抗値 $R$ と理論計算に用いる等価回路上の等価面抵抗値 $R'$ および比誘電率 $\epsilon_r$ がどのような関係にあるかが問題となる。すなわち、このような等価回路を仮定した設計においては、実際に四端子法で測定される測定面抵抗値 $R$ から、等価回路上で必要な等価面抵抗値 $R'$ と、導電紙の比誘電率 $\epsilon_r$ を決定すれば設計が可能となる。



(a) 構成

(b) 等価回路

図9 電波吸収体の構成と等価回路

図10および図11は、これらの関係について表2に示す、各試料の吸収特性より逆問題として推定された $R'$ と $\epsilon_r$ を元に $R - R'$ の関係および $R - \epsilon_r$ の関係を示している。すなわち、 $R'$ と $\epsilon_r$ は、各試料の吸収特性から次式を用いて定義された残差二乗和を最小になるように、最小二乗法を用いて推定された値であり、 $\times$ 印は図5における垂直方向の場合、 $+$ 印は水平方向の場合である。さらに、実線および破線は、これらの結果から最小二乗法で得られた式(8)~(11)の実験式より計算した補間曲線である。

$$R' = 1.03 \times R \quad (\text{垂直な場合}) \quad (8)$$

$$R' = 0.89 \times R \quad (\text{水平な場合}) \quad (9)$$

$$\epsilon_r = 4428/R + 4.1 \quad (\text{垂直な場合}) \quad (10)$$

$$\epsilon_r = 5773/R + 2.5 \quad (\text{水平な場合}) \quad (11)$$

ここで、各式は近似的にX帯およびKu帯において周波数分散特性が無いとの仮定のもとで算出した場合であり、また、このとき式(8)および式(10)は塗料の塗り方向に対して電界が垂直な場合、式(9)および式(11)は電界が水平な場合の実験式である。

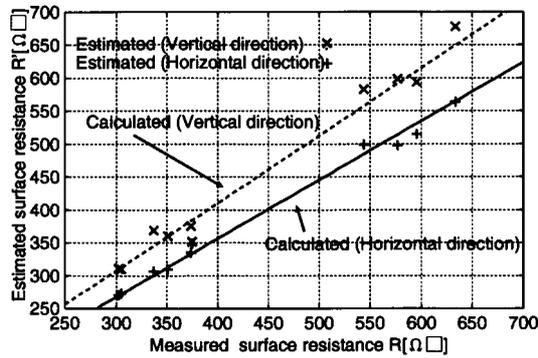


図10 測定面抵抗値 $R$ と等価面抵抗値 $R'$ の関係

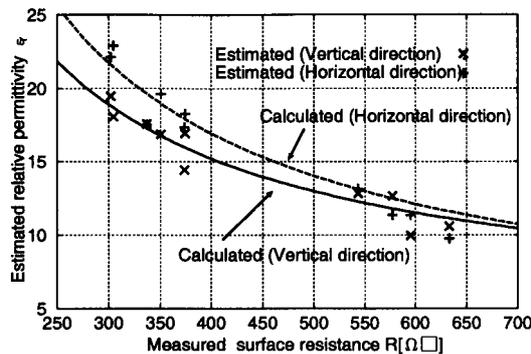


図11 測定面抵抗値 $R$ と比誘電率  $\epsilon_r$ の関係

### 3.5 実用的設計と吸収量

#### 3.5.1 設計法

このような $R - R' - \epsilon_r$ の關係に着目し、一例として電界と塗料の塗り方向が水平な場合について、X帯においては $f_c=10\text{GHz}$ 、またKu帯においては導電紙の誘電率により整合周波数が低域に変化することを考慮して $f_c=16\text{GHz}$ と選択し、設計を行った。

設計においてはまず、等価回路から吸収量が最大となる等価面抵抗値 $R$ を求め、塗料の塗り方向が水平な場合に着目し、式(9)より実際に紙に塗る面抵抗値 $R$ を計算し、次にこの面抵抗値 $R$ から式(11)を用いて比誘電率 $\epsilon_r$ を導出し、整合周波数に応じたスペーサの厚みを決定した。

以上の方法を用い、図9に示す等価回路において、導電紙の面抵抗値とスペーサの厚みを求めた結果を表3に示す。これより設計値は、3.2項で示した簡易設計法の設計諸元(Simplyで示す)と比較して大きく異なり、特にスペーサの厚みが薄くなることから、吸収体の厚みを薄くできることが分かった。

表3 設計値(水平)の場合

Matching frequency[GHz]	Thickness of spacer[mm]	
	Practicaly	Simply
10(at X band)	5.96	7.50
16(at Ku band)	3.22	4.69
	Surface resistance[Ω□]	
10(at X band)	422.8	376.7
16(at Ku band)	422.8	376.7

#### 3.5.2 吸収特性

表3に示す設計諸元に基づき、2種類の吸収体を製作し、前述の反射電力法を用いて吸収量の測定を行った。表4にその製作諸元を示す。この表より製作した試料は、設計諸元に対して面抵抗値で1程度、スペーサの厚みで0.1mm程度の製作誤差であった。

表4 測定試料

Freq.	Thickness of spacer[mm]	Surface resistance [ $\Omega\Box$ ]
X band	6.20 $\pm$ 0.05	423 $\pm$ 38
Ku band	3.15 $\pm$ 0.10	423 $\pm$ 38

図12に、これらの試料について吸収特性の測定結果と表4の測定諸元と実験式を用いて計算した理論値を示す。ここで、破線は測定値、実線は理論値である。この結果、それぞれの試料の測定値と理論値は、整合周波数において最大でも0.4GHz程度の違いしか見られず、吸収量のピークも35～40dB程度と良好な吸収特性を得ることができた。さらに、20dB以上の吸収範囲もX帯用においては8.2～10.6GHzおよびKu帯用においては14.1～17.2GHzと広帯域性を有する電波吸収体を実現できることも確認できた。そして、上記の設計法を用い、ほぼ実用的な範囲で吸収量や整合周波数を調整することのできる吸収体を実現可能なことも分かった。

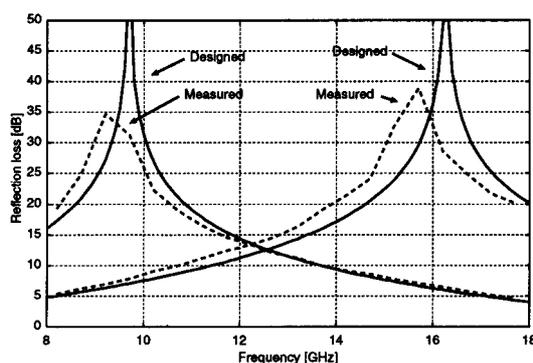


図12 吸収特性の測定結果と理論値（水平の場合）

また、図13は製作試料において電界が塗布方向に対して垂直な場合について示したものである。この結果、導電紙の方向性により吸収量は25dB程度と低下しているものの、測定値と理論値は、良好に一致した結果が得られ、このことから本電波吸収体に対してここで提案した実用的設計法が有効であることが確認された。

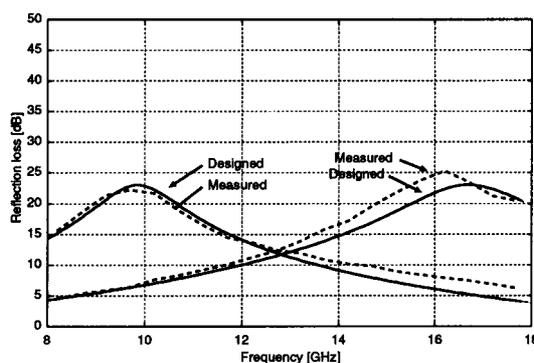


図13 吸収特性の測定結果と理論値（水直の場合）

#### 4 まとめ

本研究では、エポキシ樹脂に酸化チタンおよびカーボン粒子を添加することによる塗布型ミリ波電波吸収体、および安価な導電紙を用いた電波吸収体について実用的な設計法を検討した。この結果をまとめるとつぎようになる。

##### 塗布型ミリ波電波吸収体について

(1) 酸化チタン32phrおよび炭素粒子1phrを添加したエポキシ樹脂の複素比誘電率は、周波数50GHz～110GHzにおいて無反射曲線とほぼ平行に変化する傾向があることを確認した。(2) 上記(1)の結果から、50～110GHzの範囲において任意の周波数に対応した吸収体はその厚さを変更することにより製作可能であり、最大吸収性能を示す周波数と吸収体の

厚さには、線形関係が成り立つことを実験を通して確認した。(3) 上記(1)の結果から、50～110GHzにおいて、20dB以上の吸収性能を有する周波数範囲が5GHz以上と広帯域な吸収体が得られることを実験を通して確認した。

導電紙電波吸収体について

(1) 製作した電波吸収体の吸収特性は、X帯用およびKu帯用それぞれにおいて、設計整合周波数と0.4GHz程度の差があるものの最大35～40dB程度の高い吸収量が得られることを確認した。

< 発 表 資 料 >

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
マイクロ波帯における導電紙を用いた /4型電波吸収体に関する基礎的検討	信学論、Vol. J83-B, No.7, pp. 1043-1049 (2000)	2000年7月
V帯およびW帯用塗布型ミリ波電波吸収体に関する検討	信学論、Vol. J84-B, No.8, pp. 1523-1528 (2001)	2001年8月
金属酸化物を使用した塗布型ミリ波電波吸収体に関する基礎的検討	信学技法、EMCJ2000-25, pp. 25-30 (2000-6)	2000年6月
V帯およびW帯用塗布型ミリ波電波吸収体に関する実験的検討	電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-4-2 (2000-10)	2000年10月
単層整合型ミリ波電波吸収体の厚さと吸収特性の関係	電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-4-1 (2000-10)	2000年10月