

## ミリ波帯用シートタイプ電波吸収体の開発と実用化

## Development and Practical Application of Sheet-Type Millimeter-Wave Absorbers

橋本 修 青山学院大学理工学部電気電子工学科

O. Hashimoto, Department of Electrical Engineering and Electronics, Aoyama Gakuin University

With the development of millimeter-wave technologies, the realization of millimeter-wave absorbers for improving the electromagnetic-wave environment has become a considerable concern. This paper therefore discusses trends in sheet-type millimeter-wave absorber, namely, (1) dielectric-loss-type, (2) conductive-loss-type, and (3) magnetic-loss-type absorbers.

**Key words:** sheet-type millimeter-wave absorber, dielectric-loss-type absorber, magnetic-loss-type absorber, conductive-loss-type absorber

## 1. はじめに

1990年代に入り、ミリ波帯における半導体素子の開発が飛躍的な進歩を遂げ、周波数 100 GHz 程度までのミリ波利用システムが現実的なものとなるとともに、この分野における研究も盛んに続けられている。それらの中には、例えば、50~77 GHz 帯における、鉄道通信、無線 LAN システム、ITS (Intelligent Transport System) としての DSRC (Dedicated Short Range Communication) や自動車用レーダー、あるいは 94 GHz 帯における高分解能レーダーなどがある<sup>1)~3)</sup>。このような状況の中で、電波環境を良好にするミリ波帯やサブミリ波帯における電波吸収体の研究開発も盛んに行われ実用化の段階に入っている<sup>4)</sup>。そこで本解説では、特にシートタイプのミリ波電波吸収体について、大きく誘電損失材、磁性損失材、および導電損失材に分類し、その技術課題や研究・開発状況について説明する。

## 2. 技術課題

電波吸収体は、一般に Fig. 1 に示すように大きく四つのプロセスを経て実現される。すなわち、まず、各種材料の材料定数（複素誘電率、複素透磁率、導電率）を測定し使用材料を選択する。次にその材料を用いて電波吸収体を実現可能かどうかについて理論的に検討する。そしてもし、その材料を用いて理論的に電波吸収体を実現できるとした場合、具体的に厚みや材料定数などを設計し、その諸元に基づいて製造する。最後に、製造した試料の吸収特性を測定し、理論値と比較検討するなどして特性を評価する。

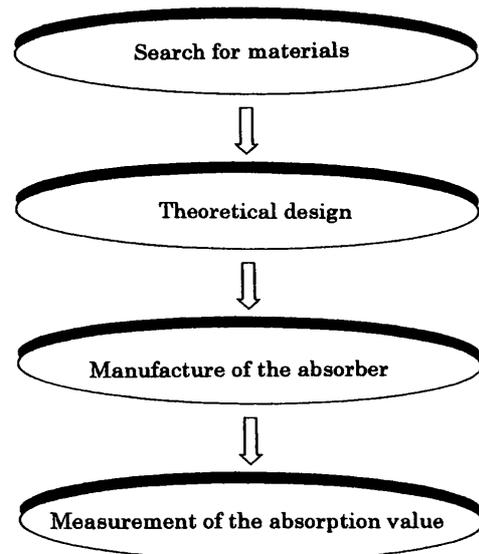


Fig. 1 Process of realizing a wave absorber.

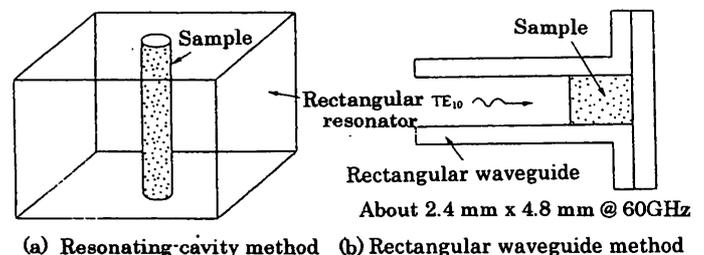


Fig. 2 Example of the measurement of a material constant.

このような実現プロセスにおいて、特にミリ波電波吸収体を実現するためには、(a) ミリ波における高損失材料の材料定数測定、(b) 電波吸収体製作時における吸収材の均一性や厚みのコントロール、(c) ミリ波帯における吸収量の測定評価という技術課題がある。

しかし、その中でも複素誘電率、複素透磁率の測定には種々の問題点や技術課題が含まれている<sup>4)</sup>。すなわち、Fig. 2 に示すように、一般に X バンド (8~12 GHz) および  $K_u$  バンド (12~18 GHz) などの測定では、導波管や共振器の寸法はその中に試料を挿入する上で寸法上の問題はないものの、ミリ帯として例えば V バンド (50~70 GHz) で使用する導波管 WR-19 は、その寸法が 4.775 mm × 2.388

mm となり、極めて小さくなる。このため、導波管の中に充填する測定試料に高い加工精度が要求され、導波管壁面と試料の間にわずかな隙間や試料変形が存在しても、その測定結果に大きな誤差が含まれることになる。このような問題に対して、試料の変形に起因する誤差検討<sup>5)</sup>やミリ波帯での材料定数の測定法としてホーンアンテナやレンズアンテナを用いた自由空間法<sup>6)</sup>も用いられている。

### 3. 誘電損失電波吸収体

誘電損失材料として、エポキシ変性ウレタンゴムと炭化ケイ素繊維 (SiC 繊維) および塗料を用いた電波吸収体について説明する。この場合、ミリ波帯での複素誘電率の測定が重要なポイントとなるが、自由空間法<sup>6)</sup> (試料の反射係数や透過係数から逆問題として複素誘電率を測定する方法) などを用いて、高精度に複素誘電率を測定し、その結果をもとに設計、製作している。

#### 3.1 エポキシ変性ウレタンゴム電波吸収体<sup>7)</sup>

**3.1.1 設計方法** Fig. 3 に示すように、1層型電波吸収体では、電気的等価回路を用いて吸収体前面から見た入力インピーダンスを計算し、その結果から反射係数が零になるように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る。

**3.1.2 製造方法** Fig. 4 にエポキシ変性ウレタンゴムを用いて電波吸収体を製作する工程を示す。この図に示すようにゴムに対する炭素粒子の混合比 (phr: parts per

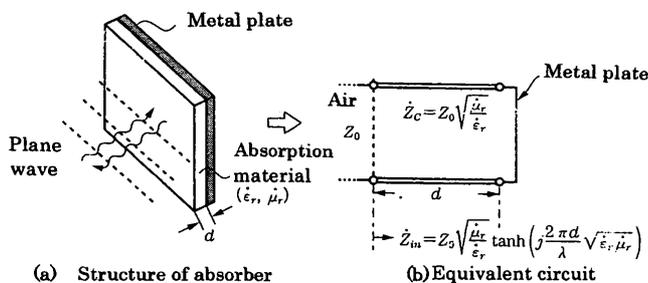


Fig. 3 Equivalent circuit.

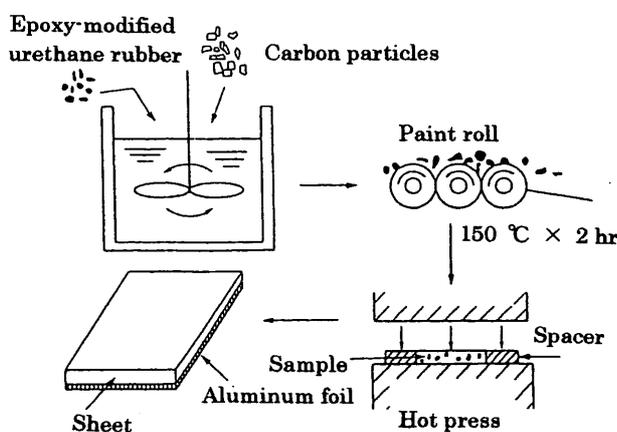


Fig. 4 Process of manufacturing an epoxy-modified wave absorber.

hundred parts of rubber) を変化させることにより複素比誘電率を調整する。そして、ペイントロールで炭素粒子を均一に分散させた後、スパーサで厚さを調整しホットプレスによりシートを製作する。

**3.1.3 吸収特性** Fig. 5 に TE 波 (Transverse Electric wave) および入射角度 30° で設計、製作した電波吸収体の測定結果を示す。この結果から、この吸収体は最大約 40 dB を超える高い吸収量を有し、1層型でありながら、広角度にわたり 20 dB 以上の吸収量を有する良好な吸収特性を示していることがわかる。

#### 3.2 SiC 電波吸収体<sup>8)</sup>

**3.2.1 製作方法** 炭化ケイ素繊維 (SiC 繊維) は、FRP (Fiberglass Reinforced Plastics) の強化繊維として使用されるが、その製造条件によって抵抗率を変化させることができる。したがって、複素比誘電率の調節が可能であり、電波吸収体材料として使用することが可能である。Fig. 6 に SiC 繊維を用いた FRP 電波吸収体の製作工程を示す。この図に示すように熱処理を施して適当な比抵抗に変化させた SiC 繊維に樹脂を含浸させプリプレグを製作し、さらにこのプリプレグを積層硬化して試料を製作する。なお、製作した試料の複素比誘電率は、エポキシ変性ウレタンゴ

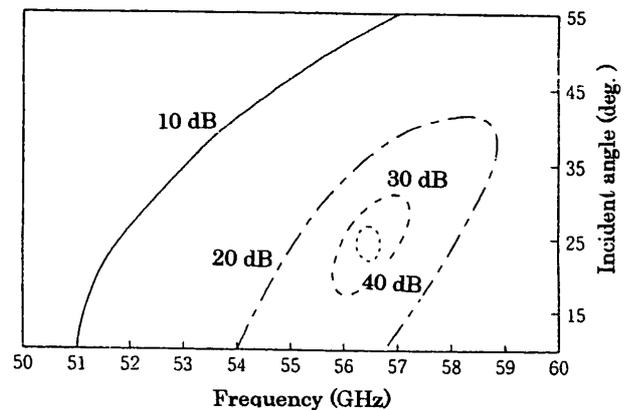


Fig. 5 Measured results.

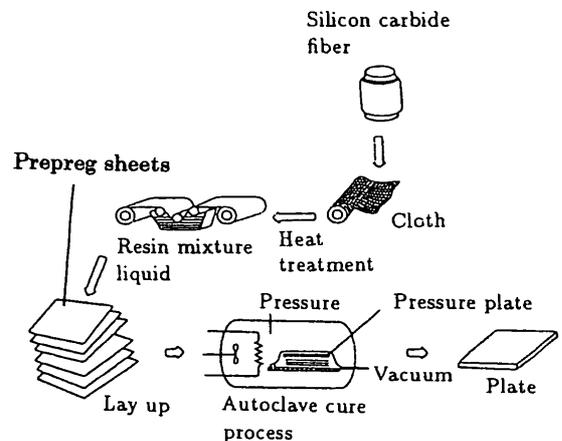


Fig. 6 Process of manufacturing a FRP wave absorber using SiC fiber.

μ<sup>7</sup>)の場合と同様に自由空間法<sup>6)</sup>で測定する。

**3.2.2 吸収特性** Fig. 7 にこのようにして製作した電波吸収体の吸収特性の測定結果を示す。測定結果から、周波数 54 GHz において、最大約 18 dB の吸収量が得られ、計算値と比較して、吸収量の最大値を示す周波数のずれは、0.5 GHz 程度に収まっていることがわかる。

**3.3 塗布型電波吸収体<sup>9)</sup>**

塗料で電波吸収体を実現できること、凹凸のある場所や電子機器の筐体内部に利用できることなどから大きなメリットがある。ここでは、エポキシ樹脂に損失材料として酸化チタンとカーボン粒子を混入した塗料による電波吸収体について説明する。

**3.3.1 製作工程** 製作工程の概略を Fig. 8 に示す。この図に示すように、エポキシ樹脂に酸化チタン 32 phr および炭素粒子 1 phr 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する。この方法によ

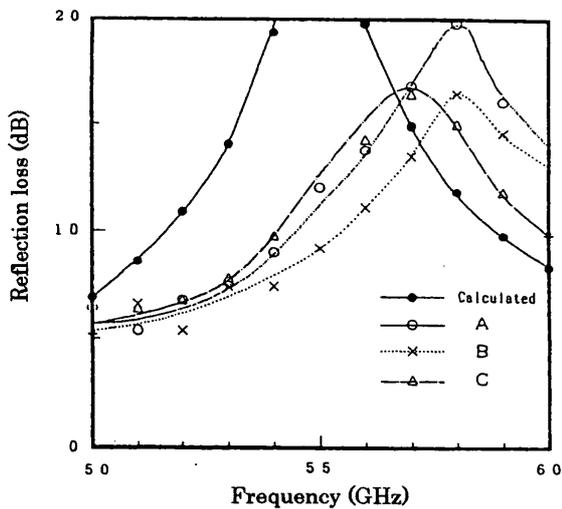


Fig. 7 Measured results.

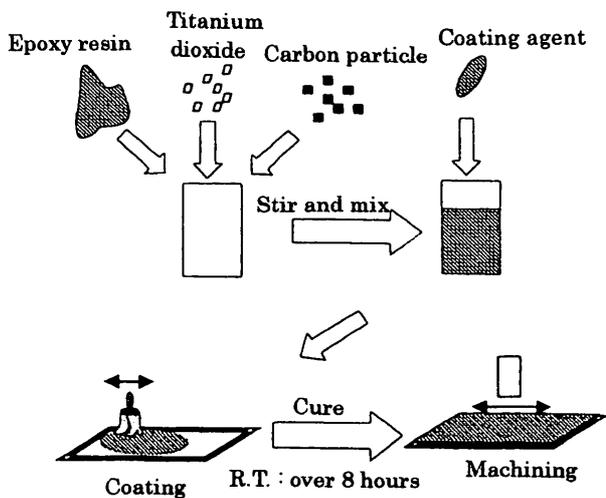


Fig. 8 Process of manufacturing an applied-type absorber.

り 8 種類の厚さの異なる試料を製作し、その複素比誘電率を位相を含めてレンズアンテナを用いた自由空間法により測定する<sup>4)</sup>。

**3.3.2 測定結果** 50~110 GHz における試料の吸収性能の測定結果を Fig. 9 に示す。ここで、試料の厚さは、渦電流式厚さ測定器 ((株)キーエンス製 EX-510) で 9 カ所の厚さを測定した値の平均値である。

この結果からわかるように、どの試料も 20 dB 以上の吸収量を示しており、良好な吸収体を実現できていることがわかる。このように同一配合で広い周波数範囲にわたり吸収体を実現できることから、最大吸収を示す周波数と吸収体の厚さの関係を求めれば、設計チャートとなる。その結果を Fig. 10 に示す。この図からわかるように、両者の間には直線関係が成り立ち、この関係式を最小 2 乗法で求めると以下の結果が得られる。

$$T = -4.56 \times 10^{-3} f_{\max} + 0.732 \quad (1)$$

ここで、 $T$  は厚さ (mm),  $f_{\max}$  は最大吸収量を示す周波数 (GHz) であり、このときの相関係数は、0.91 と良い相関が得られている。

さらに、これらの試料は、1 層型であるにもかかわらず、20 dB 以上の吸収性能を示す周波数範囲は 5 GHz 以上と広帯域になっている。この理由は、周波数に伴う複素比誘

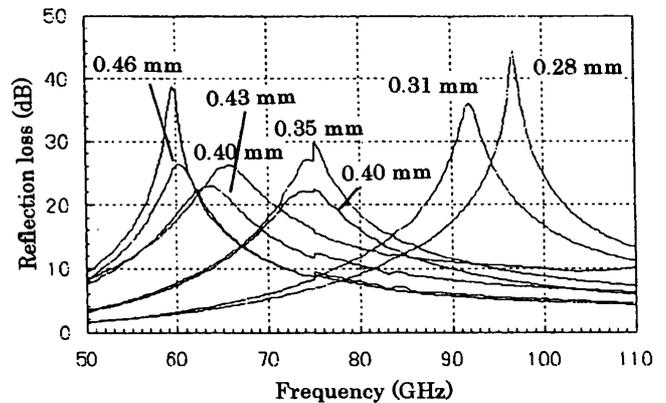


Fig. 9 Measured results.

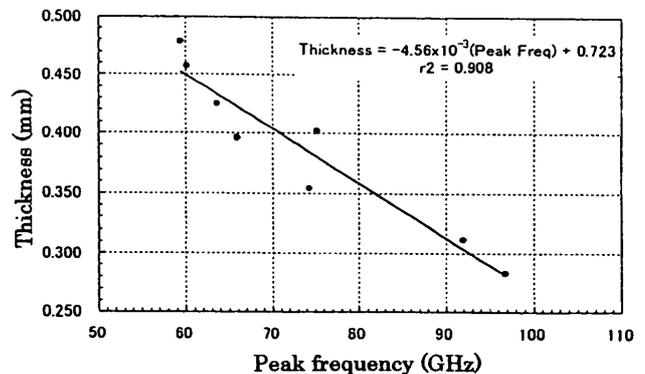


Fig. 10 Relationship between thickness and matching frequency.

電率の変化が無反射曲線（整合条件を与える $\epsilon_r$ と $d$ の関係）とほぼ平行になっており、しかも周波数が高くなるにつれて、その複素比誘電率の実部、虚部ともに減少する傾向にあるためである。以上のことからこの材料は、吸収体として極めて有効なものであることがわかる。

#### 4. 磁性損失電波吸収体<sup>10)~14)</sup>

30 GHz 帯や 60 GHz 帯においても磁性損失材を用いた電波吸収体の研究が盛んに行われ始めている。これらの中でここでは磁性損失材としてマイクロ波帯において実績のある M 型六方晶フェライトを用いた 40 GHz 帯における電波吸収体の研究例を説明する。

##### 4.1 製作試料

10 GHz 帯において磁性損失材料として実績のある M 型六方晶フェライト  $\text{BaFe}_{12-x}(\text{Ti}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_x\text{O}_{19}$ <sup>11)</sup> に着目し、その  $(\text{Ti}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})$  の置換量  $x$  を 0.40~0.60 の範囲で変化させた 4 種類のフェライト焼結体を製作する。そして、製作したフェライトを粉末にし、熱塑性エストラマーに充填して、75 mm×75 mm の平板試料に加工する。ここですべての製作試料の充填量は 59.5 vol% 一定とし、それぞれのフェライトに対し、1 サンプルずつ製作する。なお、ここで置換量  $x$  とは六方晶フェライト  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  の Fe 成分を Ti, Mn で置換したモル量を意味している。

##### 4.2 材料定数

試料からの反射波について、その位相も含めて測定を行う自由空間法<sup>14)</sup>を用い、製作試料の 30 GHz から 50 GHz 帯における材料定数 ( $\epsilon_r, \mu_r$ ) の測定を行った結果を Fig. 11 および Fig. 12 に示す。この結果、置換量  $x$  の減少とともに自然共鳴周波数は高域側に移行していき、この周波数以上の周波数領域では磁気損失が大きく、電波吸収体に適した周波数帯であることが知られる。さらに、複素誘電率の周波数分散はほとんどなく、その実部は、各サンプルにお

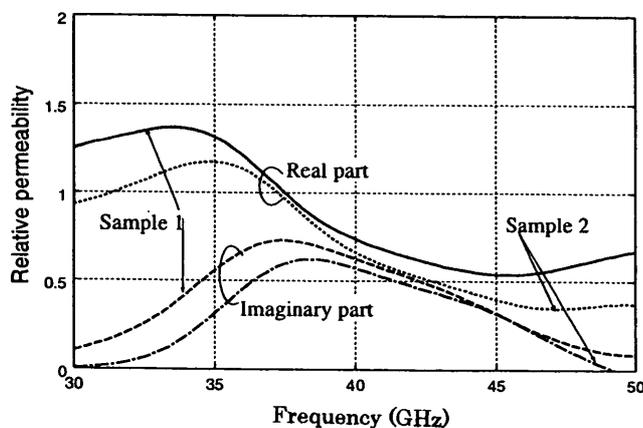


Fig. 11 Frequency characteristics of the real part of the permeability of M-type hexagonal ferrite.

いて 7.7 程度であり、虚部はほぼ零である。

この結果から、一例として Fig. 13 に試料 1 について、20 dB 以上の吸収量を示す  $\mu_r$  の上下限領域の計算結果と  $\mu_r$  の実測値を示す。この図より、 $\mu_r$  の実部と虚部は、20 dB を吸収する領域とほぼ平行に推移している帯域に広く存在することから、この試料の置換量と厚みを調節することにより、広帯な電波吸収体を実現できる可能性が示されている。

製作試料の裏面を金属板で短絡し、反射電力法を用いて吸収量の測定を行った結果を Fig. 14 に示す。この結果、高吸収量を示す帯域が 37 GHz から 47 GHz に存在し、この周波数帯において、大きな吸収量を示していることがわかる。また、それぞれの試料で、最大吸収量は 17 dB から 23 dB 程度と異なるものの、導電性や誘電性の電波吸収体では見ることができない高吸収量が一定となる周波数領域が存在することも確認できる。そして、このことから試料の厚みや  $(\text{Ti}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})$  の置換量  $x$  を調節することにより広帯域化が望めることが推測できる。

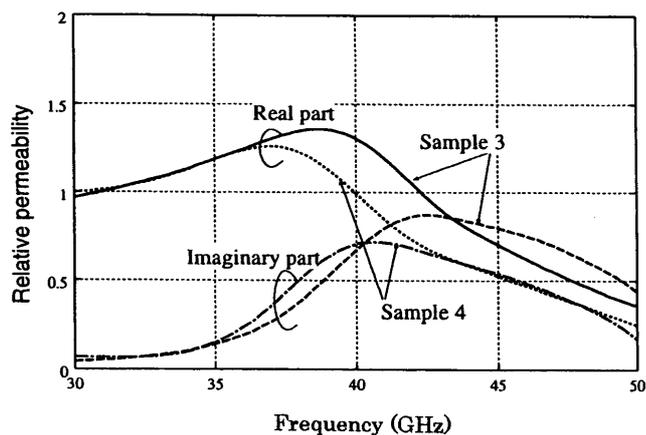


Fig. 12 Frequency characteristics of the imaginary part of the permeability of M-type hexagonal ferrite.

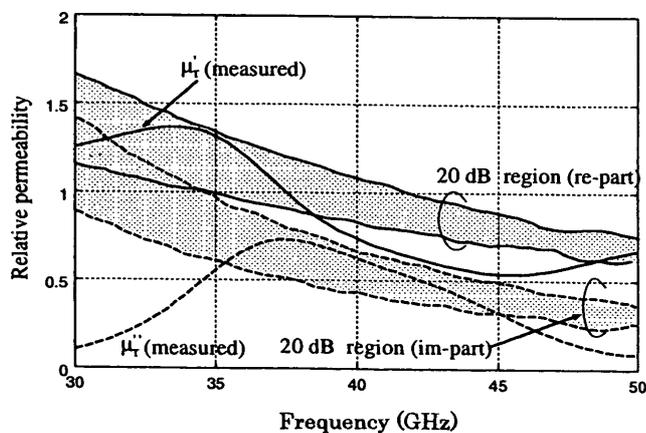


Fig. 13 Frequency characteristics and the 20 dB region (Sample 1).

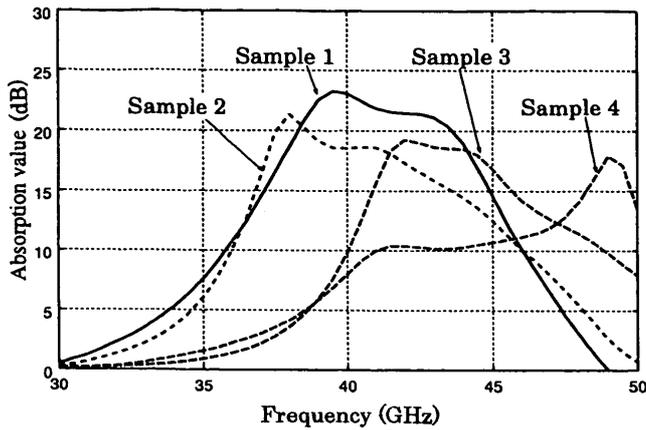


Fig. 14 Absorption characteristics.

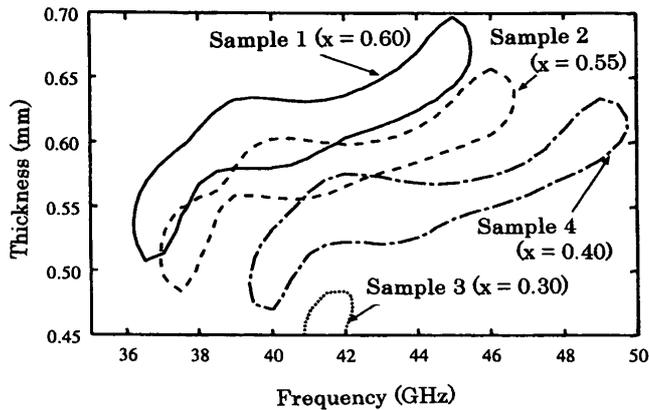


Fig. 15 Area in which the absorption value is 20 dB or more.

### 4.3 設計チャート

各試料について、先の Fig. 11 および 12 に示した材料定数 ( $\epsilon_r, \mu_r$ ) を用いて 20 dB 以上の吸収量を示す吸収体の厚さ、およびその周波数帯域の関係について計算した結果を Fig. 15 に示す。この図において、曲線内は 20 dB 以上の吸収量を示す厚みと周波数の領域を示す。

この結果、試料 1, 2, および 3 は、厚みを最適に選択すれば、5 GHz 程度の帯域にわたり、20 dB 以上の吸収量を示す電波吸収体の実現が確認できる。また、( $\text{Ti}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}$ ) の置換量  $x$  を 0.40 から 0.60 の範囲で変化させることにより、整合周波数を 38 GHz から 48 GHz 程度まで変化させることができることも確認できる。さらに、Fig. 15 において、20 dB 以上の吸収量を示す領域は、厚み方向には、非常に狭く、広帯域特性や、大きな吸収量を有する電波吸収体を実現するためには、置換量や吸収体の厚さに高い精度が要求されることもわかる。

また、Fig. 15 の結果において、広帯域特性の望める試料 1, 2, および 3 においてそれぞれ最も広帯域特性の可能性のある厚みを選択し、その吸収量を計算した結果を Fig. 16 に示す。この結果、試料 1 から 3 とともに、20 dB 以上の吸収量を示す帯域は、39 GHz から 47 GHz の間で、5 GHz 程度と広帯域であることが観察できる。

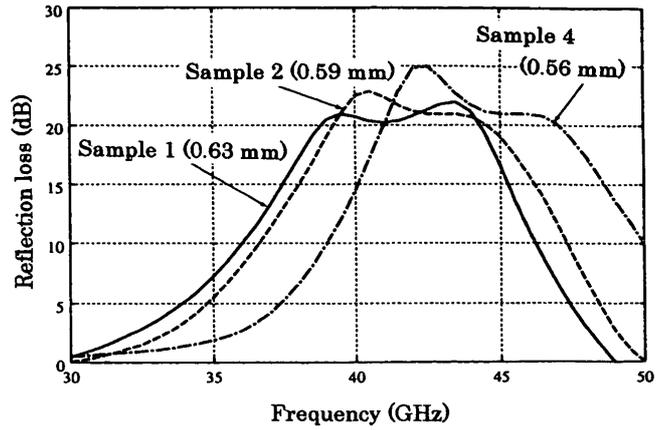


Fig. 16 Calculated results for the absorption characteristics.

## 5. 抵抗皮膜電波吸収体<sup>15)~17)</sup>

X バンドで実績のある抵抗皮膜を用いた  $\lambda/4$  型電波吸収体に着目し、この構成で電波吸収体を実現した例を説明する。抵抗皮膜を用いる利点としては、膜厚が極めて薄い場合、Fig. 17 に示すようにその面抵抗値はほとんど周波数に依存せず、DC (直流) における測定値は、ミリ波帯においてもほとんど変化しないため、誘電損失材料が磁性損失材料のように複素誘電率の周波数分散特性を測定する必要のないことが挙げられる。

### 5.1 設計・製造法

抵抗皮膜電波吸収体の一般的構成およびその等価回路を Fig. 18 に示す。この等価回路を用いて、吸収体前面から見た入力インピーダンスを計算し、それより導出した反射係数が零 (整合) となるように抵抗皮膜の面抵抗値とスペーサの厚さを決定する。

Fig. 19 に ITO (酸化インジウムスズ) の抵抗皮膜を用いたミリ波電波吸収体の製造工程を示す。すなわち、その製造工程の概略を説明すると次のようになる。(1) 保護膜 (PET: ポリエチレンテレフタレート) の下層に面抵抗がほぼ自由空間の特性インピーダンス ( $377 \Omega$ ) になるように、厚さ数百 Å の ITO (酸化インジウムスズ) 被膜

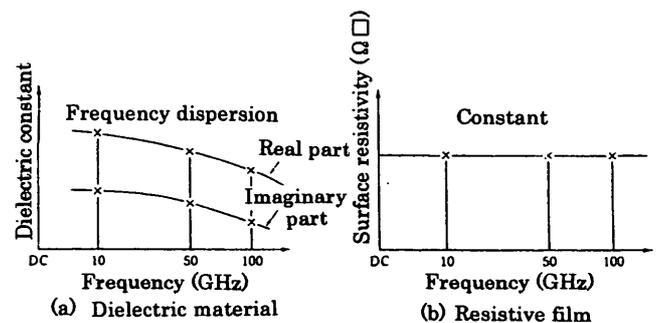


Fig. 17 Frequency dispersion of resistive film and the complex permittivity.

を蒸着形成する。(2)一方の工程において、ほぼ $\lambda/4$ の厚さを有するスペーサ(PC:ポリカーボネート)を製作する。(3)ITO膜を挟み込むように保護膜とスペーサを圧着し、同時に金属板(アルミ箔)を裏打ちし電波吸収体を製作する。

5.2 吸収特性

Fig. 20 は、このような構成において 94 GHz 帯電波吸収体を設計、製作し、その吸収特性を測定した結果である。これより最大で 40 dB 以上の吸収量が得られており、さらに吸収量が 20 dB 以上の帯域は、88~110 GHz 以上に及んでいることがわかる<sup>16)</sup>。

さらに、ここで示した抵抗皮膜を用いて、700 GHz 帯においても電波吸収体の実現性が検討されている<sup>17)</sup>。製作した試料の吸収量の測定結果を Fig. 21 に、その測定系を

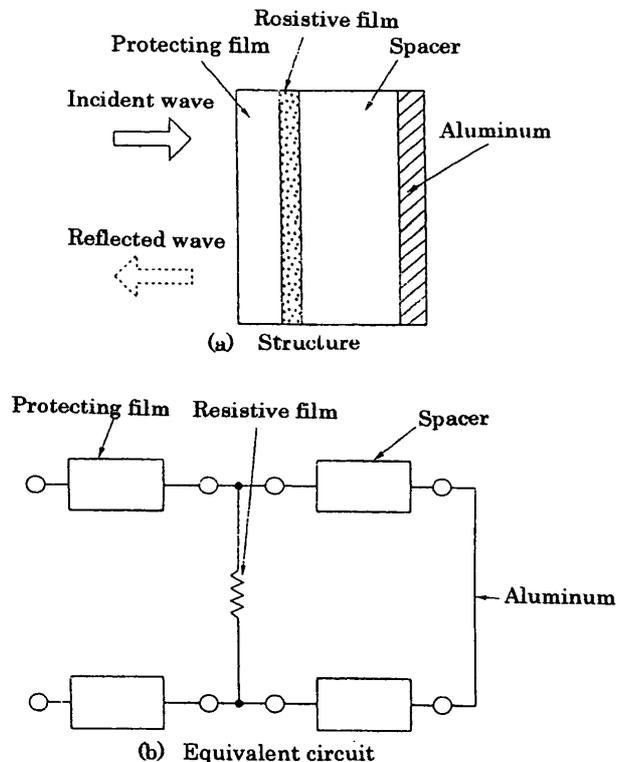


Fig. 18 Structure and equivalent circuit of a  $\lambda/4$ -type wave absorber.

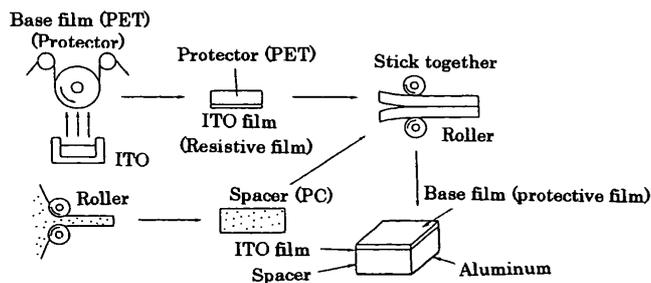


Fig. 19 Process of manufacturing a resistive-type absorber.

Fig. 22 に示す。ここで図中の Calculated, Designed, および Measured は実測値を用いた計算結果および、設計値を用いた計算結果および実験値である。

この結果、製作した 3 種類の試料は、最大で 15 dB 程度の吸収量が得られていること、および測定結果と実測値を用いた計算結果は、2~3 dB 程度のずれで良好に一致していることが確認できる。これにより、厚みを設計値に近くようにコントロールできれば、さらに大きな吸収量が期待できる。

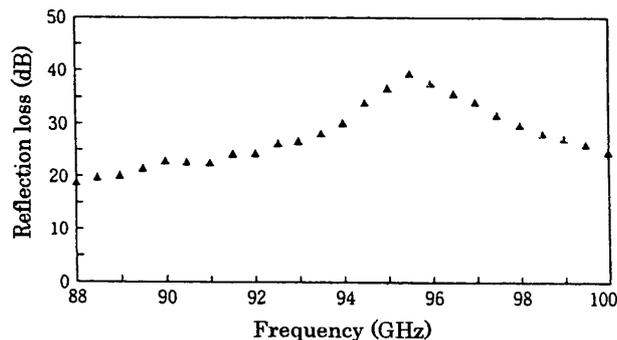


Fig. 20 Measured results (94 GHz band).

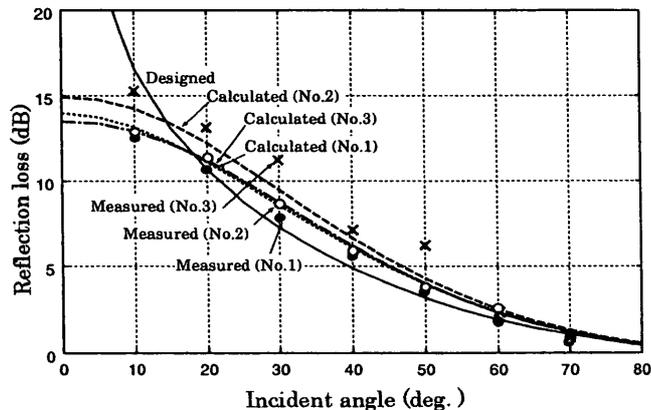


Fig. 21 Measured and calculated results.

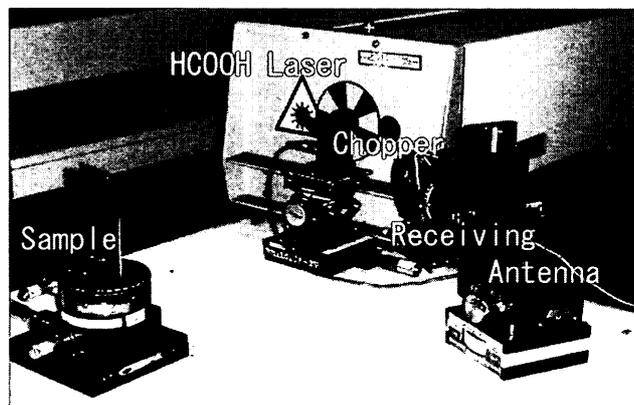


Fig. 22 Appearance of the measurement system.

## 6. む す び

以上、本解説ではシートタイプのミリ波電波吸収体として誘電損失材料を用いた電波吸収体、磁性損失材料を用いた電波吸収体、および抵抗皮膜を用いた電波吸収体について、それぞれの技術課題や研究内容について説明した。今後、ミリ波帯やサブミリ波帯の電波利用はますます活発化し、それに伴って、この帯域における電波吸収体の重要も高まってくるものと思われる。本解説が、この分野や関連分野の技術者そして研究者に少しでも役立てれば幸いである。

### 参 考 文 献

- 1) 上瀧 實ら：“ミリ波技術の基礎と応用”，リアライズ社 (1998).
- 2) “Microwave Workshop Digest,” MWE '95, pp. 214-236 (1995).
- 3) JHRI 試験研究所，“2001 年度 ITS-DSRC の電波環境改善研究” (2001).
- 4) 橋本 修 “電波吸収体のはなし”，日刊工業新聞社 (2001).
- 5) 橋本 修，阿部琢美：電気学会論文誌 A, **117**, 456 (1997).
- 6) 橋本 修，東 壽志，織壁健太郎，石坂宏幸：電子情報通信学会論文誌，B-II, **J80**, 906 (1997).
- 7) 宗 哲，吉岡典子，橋本 修：電子情報通信学会論文誌，B-II, **82**, 496 (1999).
- 8) 橋本 修，坂井和義：電子情報通信学会論文誌，B-II, **J75**, 599 (1992).
- 9) 宗 哲，橋本 修，朝倉安彦：電子情報通信学会論文誌 B, **J84**, 1901 (2001).

- 10) S. Sugimoto, K. Okayama, H. Ota, M. Kimura, Y. Yoshida, H. Nakamura, D. Book, T. Kagotani, and M. Honma: *Mater. Trans. JIM*, **39**, 1080 (1998).
- 11) 中村龍哉：1999 電子情報通信学会ソサエティ大会，B4-7 (1999).
- 12) 太田博康：2000 電子情報通信学会ソサエティ大会，B4-9 (2000).
- 13) 花澤理宏，山本一美，橋本 修：電子情報通信学会ソサエティ大会，B4-24 (2001).
- 14) Y. Iijima, T. Tanaka, M. Kimura, and R. Sato: Proc. 1999 Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, pp. 412-415 (1999).
- 15) O. Hashimoto, T. Abe, R. Satake, and M. Kaneko: *IEICE Trans. Electron.*, **E78-B**, 246 (1995).
- 16) 橋本 修，滝沢幸治，橋本康雄：電気学会論文誌 A, **117**, 632 (1997).
- 17) 花澤理宏，阿部康彦，橋本 修，安岡義純：電子情報通信学会論文誌 B, **J84**, 948 (2001).

(2002 年 8 月 23 日受理)



橋本 修 はしもと おさむ

昭 51 電気通信大学電気通信学部応用電子工学科卒業，昭 53 同大学大学院修士課程修了，同年 (株)東芝入社，昭 56 防衛庁入庁，昭 61 東京工業大学大学院博士課程修了，平 3 青山学院大学助教授，平 9 青山学院大学教授，現在に至る。  
専門 生体・環境電磁工学，マイクロ波計測工学 (工博)