

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月29日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760292

研究課題名（和文） マイクロ波からミリ波帯での実用型電波吸収体の設計と斜め入射特性測定装置の開発

研究課題名（英文） Design Method for Practical EM Absorbers and Oblique Incidence Measurement Setup at Microwave to Millimeter Waves

研究代表者

山本 真一郎（YAMAMOTO SHINICHIRO）

兵庫県立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10514391

研究成果の概要（和文）：電磁環境改善対策として、斜め入射用電波吸収体の設計とミリ波帯用斜め入射特性測定装置の開発を行った。まず、人工材料である金属線配列材を等方性電波吸収体上に積層させることにより、斜め入射時において TE 波、TM 波両偏波が整合可能な電波吸収体を設計し、その有効性を示した。次に、測定試料台にコーナーリフレクタを取り入れた斜め入射特性測定装置を作製し、ミリ波帯用電波吸収体の斜め入射特性が入射角度  $0^{\circ}$  ～ $80^{\circ}$  で簡易に測定できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：First, the method of designing EM absorber panels under oblique incident waves is proposed. TM and TE wave reflection characteristics of the absorber panel show its anisotropy under oblique incidence. By using the wire array sheet proposed this study, reflection coefficients in oblique incidence can be matched at almost the same frequency range. Next, the oblique incidence measurement setup using a corner reflector is developed. In this study, absorption characteristics of EM absorbers at millimeter waves under the oblique incidence are evaluated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：環境電磁工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学

キーワード：斜め入射用電波吸収体、金属線配列材、等方性電波吸収体、コーナーリフレクタ、斜め入射特性測定装置、ミリ波

## 1. 研究開始当初の背景

情報通信の技術は世界的に見ても急速な発展を遂げてきており、我々の生活空間、社会において必要不可欠なものとなっている。例えば、飛行場のレーダー、携帯電話、ITS等、電磁波を利用したシステムも数多く利用

されており、今後さらに発展することが見込まれる。それに伴い、不要電磁波による情報機器相互間での電磁波干渉等が問題視されている。電磁波障害の原因としては、電子機器類で発生した電磁雑音以外に、携帯電話、無線 LAN に代表されるような情報伝達を目的

とした電磁波も含まれる。それらは通信相手でない者にとっては、利用を目的としない不要電磁波と同等とみなせるため、電磁波障害源となってしまう。

これらの不具合を無くすためには、機器同士が不要電磁波の影響を受けないように、或いは機器自身が不要電磁波を放射しないように電波環境を整備する技術が必要である。その中でも不要電磁波除去対策として、電磁波エネルギーを熱エネルギーとして吸収する電波吸収体が数多く利用されている。また、情報通信に利用される周波数帯は主にマイクロ波（3～30GHz）が主流であるが、自動車衝突防止レーダー、高速無線 LAN 等が利用されるようになり、ミリ波帯（30～300GHz）を含む高周波数帯の電磁環境も整備する必要があった。

## 2. 研究の目的

上記の背景を基に、本研究ではマイクロ波からミリ波における広周波数帯での実用的な電波吸収体の設計、及び電波吸収体の斜め入射特性が測定可能な評価装置の開発を目的とした。

### (1) 実用型電波吸収体の設計について

通常、等方性電波吸収体に電磁波が垂直入射した場合、吸収体からの反射特性は入射波偏波に依らず一定である。しかし、斜め入射になると、等方性電波吸収体の反射特性は入射波偏波により異なった値を示す。

実際の情報通信機器等で使用されている電磁波は、主に斜め入射の状態を取り扱う場合が多いため、斜め入射の状態で整合条件を満たす電波吸収体設計法を確立しておく必要がある。

### (2) 電波吸収体の斜め入射特性測定装置の開発について

実際に設計した電波吸収体を評価するためには、吸収体からの反射特性を斜め入射で測定できる装置が必要となる。本研究では、マイクロ波帯の斜め入射特性評価には半径 1.5m のアーチ型測定装置を用いているが、ミリ波帯評価装置は所持していなかった。現在の一部の自動車には、ミリ波帯の周波数を利用した衝突防止レーダーが搭載されており、今後ますますその需要性が高まるものと予想されている。それに伴い、建物やガードレールにより誤って反射された電磁波が、通信相手でない他の車に悪影響を与えるという問題が生じる恐れがある。ガードレール等に入射する電磁波は主に斜め入射であるため、電波吸収体を斜め入射で評価できる装置が必要となる。

## 3. 研究の方法

### (1) 実用型電波吸収体の設計について

電波吸収体の斜め入射特性を改善する方法について検討する。図 1 に示すように、等方性電波吸収体に電磁波が斜め入射（入射角度  $\theta$ ）する状態を考える。x、y 軸方向の反射係数  $\Gamma_x$ 、 $\Gamma_y$  は、垂直入射（ $\theta=0^\circ$ ）ではほぼ等しくなるが、 $\theta=60^\circ$  の斜め入射になると、両者は異なった値を示す。

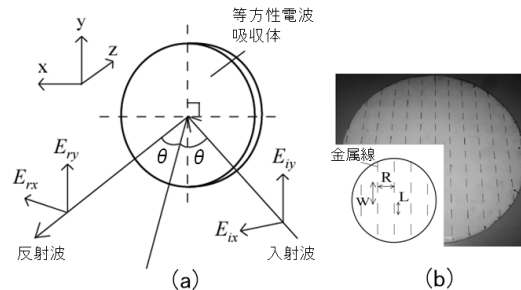


図 1 (a)入射波と反射波の関係、(b)金属線配列材

電波吸収体の斜め入射特性を改善するために、等方性電波吸収体表面に図 1(b)に示す有限長の金属線を一方方向に配列させた金属線配列材を積層させた構造の電波吸収体を設計する。金属線配列材は金属線方向のみの入射波に影響を与えるため、整合していないどちらかの反射係数の軸方向と金属線配列方向が一致するように等方性吸収体上に積層させれば、その方向のみの反射係数を整合させることができる。

金属線配列材の特徴として、図 1(b)に示す金属線長さ L、配列周期 R、W を変化させることにより共鳴分散特性を調整できる。この特徴を利用すると、共鳴周波数付近において整合条件を満たす電波吸収体が設計できる。以上のことを基に、斜め入射用電波吸収体の設計に取り組む。具体的には、先ず支持材である等方性吸収体の選定から始める。次に、金属線配列材の最適なパラメータを決定し、実際に電波吸収体を設計する。

また、近年では、ETC に代表されるように、円偏波も盛んに利用されているため、円偏波反射波の斜め入射特性の取り扱いについても検討する。

### (2) 電波吸収体の斜め入射特性測定装置の開発について

ミリ波帯における電波吸収体の斜め入射特性測定装置の開発に取り組む。本研究では、測定試料台にコーナーリフレクタを組み込むことにより斜め入射測定が可能となる装置を新たに作製する。

図 2 に示すように、コーナーリフレクタは電磁波を入射波と同方向に正確に反射するという特徴を持つ。これにより、図 2 の  $(90^\circ - \phi)$  が入射角度と見なせるため、コ

一ナーリフレクタのみを回転させれば、斜め入射での測定が可能となる。また、送受信アンテナはそのまま固定できるため、装置の小型化も実現できる。

実際には、装置の試作から始め、動作確認、種々のミリ波帯用電波吸収体の測定を行い、評価装置を確立することを目的とする。

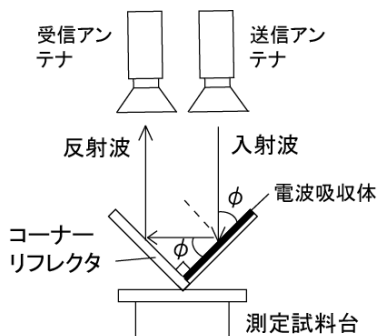


図2 コーナーリフレクタの概略図

#### 4. 研究成果

##### (1) 実用型電波吸収体の設計について

具体的にはまず、支持材として使用する等方性電波吸収体の選定から始めた。次に、それより得られた等方性吸収体である抵抗膜（ここでは、一例として導電率  $10.3 \text{ S/m}$ 、厚み  $126 \mu\text{m}$  の抵抗膜を用いる）を用い、その上に有限長金属線配列材を積層させた試料を構成した。垂直入射 ( $\theta = 0^\circ$ )、斜め入射 ( $\theta = 60^\circ$ ) の状態で、試料の反射係数  $\Gamma_x$ 、 $\Gamma_y$  を測定した結果を図3に示す。斜め入射になると、 $\Gamma_y$  は  $11.5\text{GHz}$  付近で整合するが、 $\Gamma_x$  は全周波数帯で整合しなくなることがわかる。 $\Gamma_x$  を整合させるため、x軸方向に金属線配列材を積層させたときの反射係数測定結果を図4に示す。金属線配列材を用いることより、 $\Gamma_x$  は  $11.5\text{GHz}$  付近で整合した。以上の結果より、本吸収体構成によりx軸、y軸方向の両偏波成分 (TE波、TM波) が整合可能であることを実験的に確認した。通常、等方性電波吸収体の反射特性は斜め入射の場合、入射波偏波により異なった値を示すが、上記で述べたように金属線配列材を用いることにより、斜め入射特性が改善できることを確認した。

また、金属線配列材の構造パラメータ (金属線長さ  $L$ 、配列間隔  $R$ 、 $W$ ) を調整することにより、他の入射角度においても電波吸収体の整合周波数を制御できることを実験的に確認した。さらに、本試料構成において、円偏波反射波の斜め入射特性を改善できることも確認した。

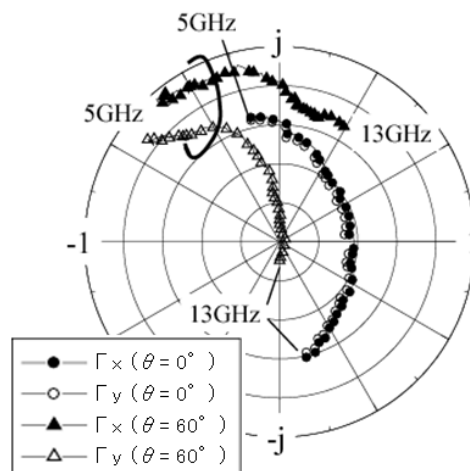


図3 反射係数測定結果 (入射角度  $\theta = 0^\circ$ 、 $60^\circ$ )

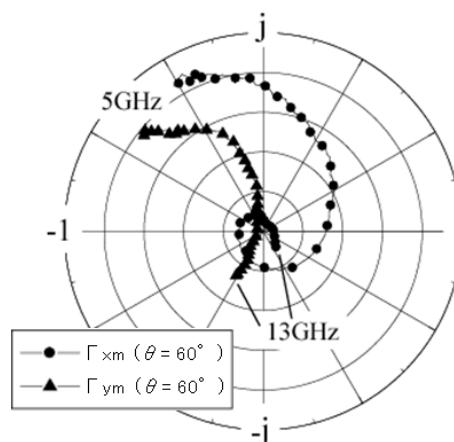


図4 反射係数測定結果 (金属線配列材を積層した場合)

##### (2) 電波吸収体の斜め入射特性測定装置の開発について

本研究では、 $40 \sim 60\text{GHz}$  のミリ波帯において電波吸収体の斜め入射特性が測定可能な装置を試作した。本測定装置は図5に示すように、通常の実験室内に十分に収まるような大きさとなるように、高さ、幅、奥行きを各々  $1.5\text{m}$ 、 $1.1\text{m}$ 、 $0.9\text{m}$  の箱型とした。装置上部に通倍器、方向性結合器、送受信アンテナ等から構成されるミリ波回路部を設置し、装置下部の測定試料台にコーナーリフレクタを取り入れ、斜め入射特性が測定できる工夫を設けた。これにより、送受信アンテナは固定した状態のままで、コーナーリフレクタを回転するだけで反射波の斜め入射の測定が可能となった。反射波の測定には、平成22年度に導入したスペクトラム・アナライザ (Agilent Technologies E4407B) を用いた。種々のミリ波帯用電波吸収体の反射特性を測定し、装置の動作確認を行った。

次に、本装置の測定可能入射角度について検討した。その結果、入射角度が  $0^\circ \sim 80^\circ$

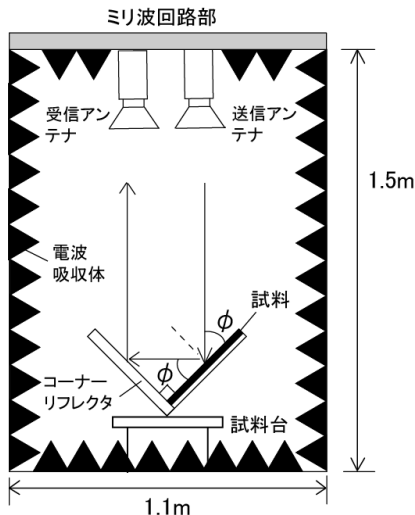


図5 電波吸収体の斜め入射特性測定装置

の斜め入射の状態電波吸収特性が測定できることを確認した。その後、種々の電波吸収体の斜め入射特性を  $0^\circ \sim 80^\circ$  の範囲で測定し、有効な結果を得ることができた。一例として、周波数 50GHz において、カーボン含浸ウレタンシート（カーボン量 5g/L、厚み 20mm）の反射係数を測定した結果を図6に示す。この結果より、TM波の場合、 $65^\circ$  程度までは反射係数は -20dB 以下となり、整合条件を満たすことを確認した。また、TE波の場合、 $40^\circ$  を除いて反射係数は -20dB 以上となった。また、TE波、TM波ともに入射角度を大きくすると、反射係数が大きくなる傾向が得られた。

以上の検討より、本測定装置が電波吸収体の斜め入射特性測定に有用であることを示した。従来より、電波吸収体の斜め入射の測定には、アーチ型測定装置を用い、送受信アンテナをアーチガイドに沿って移動させるような大規模実験であったが、本評価装置は送受信アンテナを上部で完全に固定し、コーナーリフレクタの回転のみで斜め入射の測定が可能となる。本装置は実用において非常に有効である。

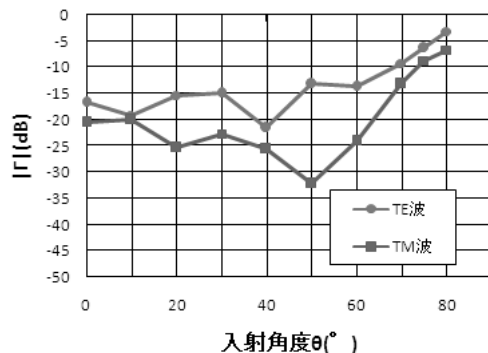


図6 カーボン含浸ウレタンシートの反射係数測定結果 (周波数 50GHz)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① 山本真一郎、石原大輔、畠山賢一、二つの共鳴周波数を有する金属線配列材を用いた広帯域整合型電波吸収体の設計・評価、電子情報通信学会論文誌 B、査読有、掲載決定
- ② S. Yamamoto、D. Ishihara、K. Hatakeyama、Design of Electromagnetic Wave Absorber Panels for Oblique Incidence Using Wire Array Sheet、IEICE Transactions on Communications、査読有、Vol. E95-B、No. 2、631-634、2012、DOI:10.1587/transcom.E95.B.631
- ③ 山本真一郎、岩井通、畠山賢一、マイクロ波帯における板状遮へい材の透過係数測定装置、電子情報通信学会論文誌 B、査読有、Vol. J94-B、No. 6、2011、771-774  
[http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j94-b\\_6\\_771&category=B&year=2011&lang=J&abst=](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j94-b_6_771&category=B&year=2011&lang=J&abst=)
- ④ 山本真一郎、畠山賢一、マイクロ波帯における異方性電波吸収体の実用的評価法、電子情報通信学会論文誌 B、査読有、Vol. J93-B、No. 11、2010、1566-1569、[http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j93-b\\_11\\_1566&category=B&year=2010&lang=J&abst=](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j93-b_11_1566&category=B&year=2010&lang=J&abst=)

〔学会発表〕(計19件)

- ① 長谷川和明、岩井通、山本真一郎、畠山賢一、ミリ波帯用電波吸収体の斜め入射特性測定例、環境電磁工学研究会 (EMCJ)、2012年1月27日、九州大学伊都キャンパス
- ② 橋本流一、岩井通、山本真一郎、畠山賢一、金属線配列材と1/4波長整合層による広帯域電波吸収体、環境電磁工学研究会 (EMCJ)、2012年1月27日、九州大学伊都キャンパス
- ③ S. Yamamoto、S. Aikawa、K. Hatakeyama、Wireless Communication and EMC Problems at Health Care System、Kickoff Symposium on Himeji Initiative in Computational Medical and Health Technology 2011、2011年11月1日、兵庫県立大学姫路書写キャンパス。
- ④ 長谷川和明、山本真一郎、岩井通、畠山賢一、ミリ波帯斜め入射特性測定装置による電波吸収特性評価、平成23年電気関係学会関西支部連合大会、2011年10月30日、兵庫県立大学姫路書写キャン

- パス
- ⑤ 石原大輔、山本真一郎、畠山賢一、2 つの共鳴周波数を有する金属線配列材の特性と電波吸収体への応用、平成 23 年電気関係学会関西支部連合大会、2011 年 10 月 30 日、兵庫県立大学姫路書写キャンパス
  - ⑥ 橋本流一、山本真一郎、畠山賢一、1/4 波長整合層を用いた多層型電波吸収体の設計、電子情報通信学会ソサイエティ大会、2011 年 9 月 15 日、北海道大学札幌キャンパス
  - ⑦ 石原大輔、山本真一郎、畠山賢一、2 つの共鳴周波数を有する金属線配列材の比誘電率と偏波特性に関する検討、電子情報通信学会ソサイエティ大会、2011 年 9 月 15 日、北海道大学札幌キャンパス
  - ⑧ S. Yamamoto, D. Ishihara, K. Hatakeyama, Design of Electromagnetic Wave Absorber by Use of Metal Wire Array Sheet, 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2011 年 8 月 16 日、Long Beach Convention Center、アメリカ合衆国
  - ⑨ 石原大輔、山本真一郎、畠山賢一、2 つの共鳴周波数を有する金属線配列材を用いた電波吸収体の設計・評価、環境電磁工学研究会 (EMCJ)、2011 年 7 月 14 日、機械振興会館
  - ⑩ 橋本流一、岩井通、山本真一郎、畠山賢一、金属線配列材を用いた修正 Jaumann 型電波吸収体の特性評価、環境電磁工学研究会 (EMCJ)、2011 年 4 月 22 日、兵庫県立大学姫路書写キャンパス
  - ⑪ 長谷川和明、山本真一郎、岩井通、畠山賢一、コーナーリフレクタを用いたミリ波帯の斜め入射特性測定装置、電子情報通信学会総合大会、2011 年 3 月 17 日、東京都市大学世田谷キャンパス
  - ⑫ 橋本流一、山本真一郎、畠山賢一、金属線配列材を用いた修正 Jaumann 型電波吸収体の設計、電子情報通信学会総合大会、2011 年 3 月 17 日、東京都市大学世田谷キャンパス
  - ⑬ 岩井通、兼本貴仁、山本真一郎、畠山賢一、金属格子と損失を含む媒質層との多層構造体の電磁波反射透過特性、環境電磁工学研究会 (EMCJ)、2011 年 1 月 28 日、熊本高等専門学校熊本キャンパス
  - ⑭ S. Yamamoto, K. Hatakeyama, Properties of Artificially-designed Materials and Their Applications in EM Absorber (Invited-paper)、GCOE on Photonics and Electronics Science and Engineering、3rd Young Researchers International

- Symposium、2010 年 12 月 8 日、京都大学桂キャンパス
- ⑮ 山本真一郎、畠山賢一、電磁波吸収・遮へい材料による電磁環境改善法、兵庫県立大学シンポジウム、2010 年 9 月 27 日、イーグレひめじ
  - ⑯ S. Yamamoto, D. Ishihara, K. Hatakeyama, EM Wave Absorber Panel for Oblique Incidence Using Wire Array Sheet, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, AP-RASC' 10, 2010 年 9 月 25 日、Toyama International Conference Center
  - ⑰ 石原大輔、山本真一郎、畠山賢一、斜め入射時における電波吸収体の TE 波、TM 波整合法、電子情報通信学会ソサイエティ大会、2010 年 9 月 16 日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス
  - ⑱ 橋本流一、岩井通、山本真一郎、畠山賢一、マイクロ波帯における Jaumann 型電波吸収体の設計・評価、電子情報通信学会ソサイエティ大会、2010 年 9 月 16 日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス
  - ⑲ S. Yamamoto, D. Ishihara, K. Hatakeyama, Design of Absorber Panels for Oblique Incidence Using Wire Array Sheet, 9th International Symposium on EMC joint with 20th International Wroclaw Symposium on EMC, EMC Europe 2010, 2010 年 9 月 15 日、Wroclaw University of Technology、ポーランド

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 出願年月日：  
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 取得年月日：  
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
 該当無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 真一郎 (YAMAMOTO SHINICHIRO)  
兵庫県立大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：10514391

(2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ( )

研究者番号：