研 究

自由空間での磁性(Fe)・誘電性(TiO₂)複合体の ETC 用電波吸収特性安 英準^{☆1}, 西田 謙^{☆1}, 山本 孝^{☆1}, 植田 俊吉^{☆2}, 出口 剛^{☆2}^{☆1} 防衛大学校通信工学科, 〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20.^{☆2} (株)テイカ大阪研究所, 〒551-0022 大阪市大正区船町 1-3-47.Microwave Absorber Properties of Magnetic (Fe) and Dielectric (TiO₂) Composite Materials for ETC in Free-SpaceYoungJoon An^{☆1}, Ken Nishida^{☆1}, Takashi Yamamoto^{☆1}, Shunkichi Ueda^{☆2} and Takeshi Deguchi^{☆2}^{☆1} Dept. Comm Eng., National Defense Academy, 1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka 239-8686, Japan.^{☆2} TAYCA Corporation Osaka Research Laboratory, 1-3-47 Funamachi, Taisho-Ku, Osaka 551-0022, Japan.

Received December 12, 2008

SYNOPSIS

Recently, modern technologies of wireless communication have shown rapid progress, and because of these various applications in high frequencies there is a concern about effects on other electronic device and unexpected malfunctions. For these reasons, a microwave absorber in free space has become necessary for a safe electromagnetic wave environment.

In this report, we explain characteristic evaluations of a microwave absorber which is used in an electronic toll collection (ETC) device, fabricated by a composite of magnetic (Fe) and dielectric (TiO₂) materials. It was evaluated by free-space method with horn antennas using a transverse electric wave, a transverse magnetic wave and a circularly polarized wave. The reflection loss in free space is -20 dB or more around a central frequency of 5.8 GHz at oblique-incident angles of up to 60°, which satisfy the necessary condition for ETC use in Japan, and using arrangement and changing structure, it also satisfies necessary condition for ETC use without a characteristic deterioration. In addition, we compare experimental results with calculation results of transmission line theory as well as EEM-FDM simulation results.

KEY WORDS

microwave absorber, dielectric-magnetic composite material, free-space method, reflection loss

1 緒 言

1930年東京工業大学の加藤与五郎、武井武両博士によって銅-亜鉛系のソフトフェライトが初めて日本で発見され、1960年後半に東京工業大学 末武国弘教授、内藤喜之教授、清水康敬教授によるフェライトの高周波数領域における磁性緩和現象に着目した新しい磁性電波吸収体、即ちフェライト電波吸収体が研究開発された¹⁾。フェライトを用いた電波吸収体は、主としてTVゴースト(～800MHz)や船舶レーダーの橋体による偽像(700 MHz～26 GHz)等に対する電磁波障害対策に広く応用された。近年では、携帯電話、無線LAN、ETC(自動料金支払いシステム)、ITS(高度道路交通システム)のような今まで使用されていなかった高周波数領域の利用が多様化し、電磁波の空間への放射が急増している^{2,3)}。それらに伴い、電波利用の多様化・高度化が急速に進むにつれ、病院やオフィス、及び飛行機や高速道路等の交通機関の電磁環境は悪化し、

漏洩電磁波は電子機器等の誤作動を引き起こす要因となっている。これらの問題解決の一つとして、電波吸収体の利用が考えられて電波吸収体の需要は急速に高まっている^{4,5)}。

本研究では、電波吸収体の応用として注目されているETC用電波吸収体(日本では使用電波の中心周波数は5.8 GHz)に対し、磁性(鉄粉)・誘電性(酸化チタン粉)複合体を用いたゴムシート型電波吸収体⁶⁾を作製し、自由空間法^{7,8)}によりTransverse Electric波(以下、“TE波”と略記)、Transverse Magnetic波(以下、“TM波”と略記)及び、円偏波(Circularly Polarized波: 以下、“CP波”と略記)の斜入射特性を評価し、実験と伝送線路を用いた理論計算⁹⁻¹¹⁾(以下、“理論計算”と略記)及び、EEM-FDM解析シミュレーション^{12,13)}の両面から評価、検討を行い、本研究で述べる磁性(Fe)・誘電性(TiO₂)ゴムシート複合体電波吸収体がETC用電波吸収体の必要条件を満足することを示す。更に、均一の一体型材料から構成され

ている電波吸収体に対し、電波吸収体の軽量化、曲面など複雑構造に設置されることなどを想定し、又、施工性の向上を目的とした短冊状構造とパターン状構造の電波吸収体の作製¹⁴⁾及び、評価を行い、電波吸収特性を劣化させないでETC用電波吸収体の必要条件を満足する構造変化の範囲を検討した。

2 試料作製法

磁性・誘電性複合材料として、磁性体に鉄粉(カルボニル鉄($\text{Fe}(\text{CO})_5$)から出発、以下、“Fe”と略記)、誘電体に酸化チタン粉(以下、“ TiO_2 ”と略記)を用い¹⁵⁾、Feと TiO_2 の混合比を変えながら、任意の体積比でエチレン・プロピレン・ジエンゴム(以下、“EPDM”と略記)¹⁶⁾保持材に混合した磁性・誘電性複合体を作製した。

磁性・誘電性複合体に用いたFeは、真球状の直径1~8 μm (平均粒径は4.0 μm)の粒度分布が均質な鉄粉で、表面にナノメートル厚みのマグネタイト(Fe_3O_4)が被覆されて表面の誘電体により磁性だけでなく高い誘電性を持っている。又、フェライトに比べ一般的に透磁率は低い、スネークの限界の影響を受けず、周波数分散が高周波数側で起こるため、主に、フェライトに対して優位性が顕著となる4 GHz以上において良好な電波吸収特性を有する¹⁷⁾。 TiO_2 は、物理的、化学的に安定であり、Feと混合することで磁性電波吸収体の電波吸収量を低下させず、Feの重量を減らす及び、 TiO_2 の誘電性特性により電波吸収使用上限周波数が高くなる等の効果を持つ¹⁸⁾。又、保持材として用いたEPDMは、無損失な樹脂であり、加工しやすく、油や熱、紫外線、水等に対して優れた耐環境性を有している。

磁性・誘電性複合体試料は、磁性体材料(試料記号Fe/ TiO_2 =100/0)から誘電体材料(試料記号Fe/ TiO_2 =0/100)まで体積混合比を変え、EPDMゴムとニーダーを用いて混練し、複合体試料とした。そして、外径が $6.90 \pm 0.03 \text{ mm}$ 、内径が $3.00 \pm 0.01 \text{ mm}$ 、厚さ=任意mmのトロイダル型形状に加工し、同軸導波管(以下、“同軸導波管(7D)”と略記)を試料固定ホルダーとして、磁性・誘電性複合体の複素比誘電率 ϵ_r^* ($=\epsilon_r' - j\epsilon_r''$)及び、複素透磁率 μ_r^* ($=\mu_r' - j\mu_r''$)の周波数特性(1~18 GHz)を求めた。その結果、磁性・誘電性複合体試料の試料記号Fe/ TiO_2 =100/0~Fe/ TiO_2 =0/100の中で、ETC用電波吸収体の必要条件である中心周波数5.8 GHzで反射減衰量=-20 dBを満足するのはFe/ TiO_2 =60/40が最適であり⁹⁾、ETC用電波吸収体の基準試料としてFig.1に示すように自由空間での大型ゴムシート型電波吸収体を作製した。Fe/ TiO_2 =60/40の場合、重量比として磁性体材料のFeが600 g、誘電体材料 TiO_2 が400 g、EPDMが100 gで、充填率はいずれも90.9%であるが、Feの平均粒径は4.0 μm で比重は7.8、 TiO_2 の平均粒径は0.98 μm で比重は0.9であるため、体積比(vol.%)から見ると、Feが26.0 vol.%, TiO_2 が36.5 vol.%, EPDMが37.5 vol.%であり、EPDMの体積比が一番大きく、誘電体の TiO_2 の体積比(vol.%)が磁性体のFeの体積比(vol.%)より大きい体積比を持っている。本研究で用いたETCの中心周波数である5.8 GHzでのFe/

TiO_2 =60/40の材料定数 ϵ_r' 、 ϵ_r'' 、 μ_r' 及び、 μ_r'' の値は、 $\epsilon_r'=13.928$ 、 $\epsilon_r''=1.118$ 、 $\mu_r'=1.751$ 、 $\mu_r''=0.601$ であり、これらの値は、本研究の基準値として、前節の伝送線路の理論計算及び、CSI社のMICROWAVE STUDIO(以下、“EEM-FDM”と略記)シミュレーション¹⁹⁾で用いた。

3 測定方法

自由空間における反射減衰量の測定は、測定精度を高めるため、Fig.2(a)で示す電波暗室(電波無響室内)でFig.2(b)に示すアーチ法測定系²⁰⁾を利用し、ネットワークアナライザー(WILTRON(製)360B)を用いて木製アーチにホーンアンテナを取り付け、入射角度 θ_i を10°から60°まで5°間隔で変化させ、TE波・TM波・円偏波の斜入射特性(バースタチング)(以下、“斜入射特性”と略記)を測定した。更に、広いダイナミックレンジと周波数ドメインデータの誤差補正のためタイムドメイン法を用いて周辺からの不要電波を軽減、除去した²¹⁾。

本研究で用いた自由空間法における5.8 GHzでの反射減衰量測定系として、自由空間でホーンアンテナのような方形開口からの電磁波放射を考えた場合、Fresnel領域とFraunhofer領域の境界^{22,23)}を与える距離 R はFar-Field条件($R \geq 2D^2/\lambda$)式で求められる。ここで、 R はアンテナ間距離(放射アンテナー基準金属板-受信アンテナ間距離)、 D はアンテナの開口寸法、 λ は周波数の波長である。更に、ホーンアンテナの指向性利得は $Gd=4\pi D^2/\lambda^2$ で与えられる。本研究で用いた直線偏波のTE波・TM波用のFlann microwave(社)製送受信ホーンアンテナ(Model No. 12240-20: 3.94 GHz~5.99 GHz, Model No.

Fig.1 Sample structure and arrangement in free-space method for (a) ALL, (b) STRIP (changing d from 5, 10 mm) and (c) PATTERN (changing d from 5, 10 mm).

Fig.2 (a) Experimental set up and (b) Schematic figure for reflection loss in arch method with horn antennas (free-space method).

14240-20: 5.38 GHz ~ 8.18 GHz, いずれも中心周波数 5.8 GHz で指向性利得が 24 dB) 及び, 円偏波用の ETS・LINDGREN (社) 製スパイラルアンテナ (Model No. 3102L, Conical Log Spiral: 1 GHz ~ 10 GHz, 5.8 GHz で指向性利得が 24 dB) を用いると, Fraunhofer 領域を与えるアンテナ間距離は 1.94 m/Hz となり, 本研究の実験で利用した直径 3 m の木材アーチは Far-Field 条件を満足した.

自由空間法の測定系で試料のサイズ依存性を満足する試料寸法及び, 試料構造は, Fig.1 に示した 3 種の構造を用いた. Fig.1 (a) は基準金属板 (反射板) と同じ寸法のゴムシート型の縦×横×厚み = 600 mm × 600 mm × 2.30 mm (正方形の均一形材, 以下 'ALL' と略記) である. 又, 電波吸収体の軽量化及び, 吸収特性を劣化させないで加工性の向上を目標とし

Table 1 Necessary conditions of ETC microwave absorber.

Central frequency	5.8 GHz	
Reflection loss	Incident Angle	
	0° ~ 45°	Below -20 dB
	45° ~ 47.5°	Below -20 dB
	47.5° ~ 50°	Below -15 dB
	50° ~ 55°	Below -10 dB
Incident Wave	Circularly Polarized (CP) wave	

均一構造を変更した Fig.1 (b) 短冊状 (幅 100 mm, 長さ 600 mm) に並べた (以下, '短冊状' と略記) 構造, Fig.1 (c) 100 mm 角の正方形に並べた (以下, 'パターン状' と略記) 構造で短冊状, パターン状構造いずれも 試料と試料の間隔 d を 5 mm から 10 mm まで 5 mm 間隔で広げて試料を配置した構造を用いた.

4 測定結果および考察

Table 1 に示す ETC 用電波吸収体の必要条件^{20,24)} である 10° ~ 60° の入射角度で反射減衰量を満足する磁性 (Fe)・誘電性 (TiO₂) 複合体を用いたゴムシート型電波吸収体を評価するため, 前節の測定条件を用いて理論計算とシミュレーション及び, 自由空間での実験を行なった.

Fig.3 に Fe/TiO₂ = 60/40 ゴムシート電波吸収体 (ALL) を用い, Fig.2 に示した電波暗室の中でアーチ法を利用した自由空間法の TE 波, TM 波, 円偏波の斜入射特性による反射減衰量を示す. ここで, ゴム複合体シート試料の特徴である延伸方向による電波吸収体の特性変化を見るため^{25,26)}, Experimental A はゴム試料の延伸方向 (試料の延伸方向の角度 = 0° の場合, 以下, 'Ex. A' と略記), Experimental B は試料の延伸方向に垂直方向 (試料の延伸方向の角度 = 90° の場合, 以下, 'Ex. B' と略記) と区分して実験を行なった. 又, 自由空間法で用いた同一の試料の複素比誘電率 ϵ_r^* 及び, 複素比透磁率 μ_r^* を利用し, 伝送線路理論式を用い斜入射角度 θ_i を 0° から 60° まで

Fig.3 Experimental, calculated and simulated reflection loss of magnetic/dielectric composite (Fe/TiO₂ = 60/40) rubber sheet for TE, TM, CP waves when incident angle was changed from 0° ~ 60° in free space, (a) TE wave, (b) TM wave and (c) CP wave.

1°間隔として求めた計算値及び、EEM-FDMシミュレーションを用いて、斜入射角度 θ_i を 0° から 50° まで 5° 間隔で変化させたシミュレーション結果のTE波、TM波、円偏波の入射角度依存性による反射減衰量を示す。

入射電波の電界が入射面に垂直であるTE波の場合、Fig.3 (a)に示す各入射角度による反射減衰量は、入射角度が増加すると共に減少する傾向を示し、理論計算値とシミュレーション値及び、実験値(Ex. A及び、Ex. B)が良い一致を示した。入射電波の磁界が入射面に垂直であるTM波の場合、Fig.3 (b)に示すように、入射角度がある値で反射係数が零となる入射角(ブリュースター角 θ_B)がある。ブリュースター角は、計算値が $\theta_B = 31^\circ$ 、シミュレーション値が $\theta_B = 30^\circ$ 、実験値が Ex. A, Ex. B 共に $\theta_B = 30^\circ$ であり、このブリュースター角で最大反射減衰量を示した。ブリュースター角の差は、角度1°間隔(計算)と角度5°間隔(シミュレーション及び、実験)の間隔の違いによる差である。反射減衰量の場合、実験値が-34 dBに対し、計算値が-60 dB、シミュレーション値が-54 dBで約-20 dB以上の差があるが、エネルギー的には-30 dBの99.9%吸収に対し、-50 dBは99.999%の差なので、理論計算値、シミュレーション値及び、実験値は良い一致を示した。次に、ETCに実際に使用されている円偏波の斜入射特性は、直線偏波のTE波及び、位相が $\pi/2$ だけ進んだTM波の位相成分を考慮したベクトル平均としてFig.3 (c)に示すように、反射減衰量は、理論計算値と実験値 Ex. A, Ex. B 共に、円偏波はTE波とTM波の結合でありながらTM波で見られたような反射減衰量が極大値を与える入射角度が存在せずに全ての斜入射角度で-20 dB以下の反射減衰量を示した。

Fig.4にETC用電波吸収体の必要条件の一つである円偏波を用いた、中心周波数5.8 GHzでの反射減衰量の斜入射特性の実験結果を示す。実験値A方向(Ex. A)、B方向(Ex. B)共に10°~60°の入射角度で-20 dB以下の反射減衰量が得られTable 1に示したETC用電波吸収体の必要条件を満足した。均一材料から構成されているETCシステムの均一電波吸収体(Fig.1(a)参照)に対し、電波吸収体の軽量化、曲面など複雑構造に設置されることなど、施工性の向上を目標とした短冊状(Fig.1(b)参照)及び、パターン状(Fig.1(c)参照)に電

Fig.4 Experimental results for reflection loss of magnetic/dielectric composite (Fe/TiO₂ = 60/40) rubber sheet, incident angles from 10° to 60°, for the CP wave at 5.8 GHz.

波吸収体を並べた構造の電波吸収特性を評価した。

Fig.5に電波の斜方向による短冊状試料の配置位置を示す。Fig.5 (a)はA方向と呼び入射波-反射波方向と短冊状の長さ方向が直行する方向(以下、“短冊状構造A”と略記)である。Fig.5 (b)はB方向と呼び、入射波-反射波方向と短冊状の長さ方向が平行する方向(以下、“短冊状構造B”と略記)である。試料と試料の間隔は、各100 mmの試料幅に対し、5 mmから10 mmまで5 mm間隔で可変し、入射角度 θ_i を10°から60°まで5°間隔で変化させたTE波、TM波及び、円偏波を用いて測定した。又、同一の条件でEEM-FDMシミュレーションを用いて、斜入射角度 θ_i を0°から50°まで5°間隔でTE波、TM波及び、円偏波のシミュレーションを行い実験結果と比較を行った。Fig.1 (c)に示したパターン構造の場合、ホーンアンテナの入射方向と試料構造の間には、短冊状で見られた違い(A方向、B方向)は無く、他の測定条件は短冊状構造の場合と同じである。

Fig.6に短冊状構造を用いたFe/TiO₂ = 60/40 ゴムシートのTE波、TM波及び、円偏波を用いた場合の反射減衰量の実験値及び、EEM-FDMを用いたシミュレーションの斜入射角度依存性を示す。但し、ALLの記号はFig.3 (a) ALLの正方形の均一材料材記号、5, 10は、短冊状試料間隔が $d = 5$ mm, 10 mmの場合である。

入射電波の電界が入射面に垂直であるTE波で短冊状構造Aの場合、実験値の反射減衰量は、Fig.6 (a)に示すように入射角度が低角度側で反射減衰量が大きくなった。シミュレーションの場合、間隔 $d = 10$ mmで斜入射角度が10°で最大値を示し、同様に実験値も間隔 $d = 10$ mmでシミュレーションに見られた低入射角度で最大の反射減衰量が見られ、実験値とシミュレーションは良い一致を示した。TE波の短冊状構造Bの場合、反射減衰量は、Fig.6 (b)に示すように入射角度が低角度側で反射減衰量が実験値とシミュレーション共に単純に大きくなった。

Fig.5 Schematic figure between electromagnetic wave propagation path and strip shaped structure (a) A direction and (b) B direction.

Fig.6 Incident angle dependence of experimental (10°~60°) and simulated (0°~50°) reflection loss for TE (a) (b), TM (c) (d) and CP (e) (f) waves of magnetic/dielectric composite (Fe/TiO₂ = 60/40) rubber sheet with a strip-shaped structure.

Fig.7 Experimental results for reflection loss by changing structure (a) STRIP A direction, (b) STRIP B direction and (c) PATTERN structure of magnetic/dielectric composite (Fe/TiO₂ = 60/40) rubber sheet, incident angles from 10° to 60°, for the CP wave at 5.8 GHz.

入射電波の磁界が入射面に垂直である TM 波の反射減衰量は、短冊状構造 A の場合、Fig.6 (c) に示すように、TM 波の特長であるブリースター角 θ_B が存在し、実験値の場合、ALL と $d=5$ mm は 30° で一定値を示すが、隙間が $d=10$ mm が増加すると 25° の低い入射角度に移動した。一方、シミュレーション値は各短冊状の隙間の間隔幅が $d=5$ mm, 10 mm と増加すると、ブリースター角 θ_B が 5° 間隔で 30° から 25°, 20° と低い入射角度に連続的に移動した。一方、TM 波短冊状構造 B の場合、Fig.6 (d) に示すように、電波の伝搬方向と間隔幅方向が直交しているために、各短冊状間の幅に大きく依存し、間隔が $d=5$ mm, 10 mm と変化するとブリースター角 θ_B は実験値とシミュレーション値共に大きく低角度側に移行したと同じ傾向を示した。実験値とシミュレーション値の差は実

験で用いた短冊状試料の配置位置のずれ (Fig.1 (b), (c) に示す d の不均一) が一原因と思われる。位相を $\pi/2$ ずらして電界成分及び、磁界成分が回転している円偏波の反射減衰量は、短冊状構造 A, B の場合、Fig.6 (e) 及び、Fig.6 (f) に示すように、各短冊状の隙間の間隔幅が $d=5$ mm, 10 mm と増加すると反射減衰量が大きくなり、実験値とシミュレーション値が同じ傾向の斜入射特性を示した。

Fig.7 は ETC 用電波吸収体の必要条件である円偏波を用いた中心周波数 5.8 GHz での短冊状及び、パターン構造の反射減衰量を示す。Fig.7 (a) 短冊状構造 A, Fig.7 (b) 短冊状構造 B 及び、Fig.7 (c) パターン状構造に示されるように、試料間隔 d を 10 mm まで増加しても全ての角度 (斜入射角度 = 10°~60°) で -20 dB 以下の反射減衰量を示し、ALL と共に短冊状構造

及び、パターン状構造を用いても 5.8 GHz での ETC 必要条件を満足した。以上に示したように、電波吸収特性を劣化させないで、構造変形により複雑構造に対応が可能であり、軽量化として均一の一体構造より体積・重量が短冊状構造の場合 9.1 %, パターン状構造の場合は 19 % 減少した。

5 ま と め

ETC 用電波吸収体 (5.8 GHz) のために、磁性 (Fe)・誘電性 (TiO_2) 複合体 ($\text{Fe}/\text{TiO}_2 = 60/40$) ゴムシートを作製し、自由空間法による TE 波, TM 波及び、円偏波を用いて電波吸収特性を評価した。同時に、理論計算及び、EEM-FDM シミュレーションより実験値との比較を行ない以下の結果を得た。

- (1) $\text{Fe}/\text{TiO}_2 = 60/40$ ゴムシートを斜入射角度 θ_i による TE 波, TM 波及び、円偏波の自由空間法の実験値と理論計算値及び、EEM-FDM シミュレーション結果を比較した結果、良い一致をしていることを示した。ETC で使用している円偏波を用いて、ETC 用電波吸収体の必要条件である中心周波数 5.8 GHz での反射減衰量が 10° から 60° まで、全ての角度で -20 dB 以下の反射減衰量を示し ETC 用電波吸収体の必要条件を満足していることを示した。
- (2) 均一の一体形材料から構成されている ETC システムの均一電波吸収体に対し、電波吸収体の軽量化、施工性の向上を目標とした短冊状とパターン状の電波吸収体を作製、評価を行い、自由空間法の実験値と EEM-FDM シミュレーション計算値を比較した結果、一部には不一致が見られたが、傾向は一致した。短冊状とパターン状構造の試料間隔を 10 mm まで変化しても全ての角度 (斜入射角度 $= 10^\circ \sim 60^\circ$) で -20 dB 以下の反射減衰量を示し、均一の一体形材料と共に 5.8 GHz での ETC 必要条件を満足し、電波吸収特性を劣化させないで、構造変形により複雑構造に対応と軽量化が可能であることを示した。

以上の結果より、実験と理論計算及び、EEM-FDM シミュレーションの両面から評価、検討を行い、磁性・誘電性複合体として $\text{Fe} \cdot \text{TiO}_2$ 複合体 ($\text{Fe}/\text{TiO}_2 = 60/40$) ゴムシートが ETC 用電波吸収体の必要条件を満足すること及び、構造を変化した電波吸収体へ応用が可能であることを示した。

文 献

- 1) Y. Kotsuka: "Ferrite Electromagnetic Wave Absorber", Trans. Magn. Soc., **21**(1997)1159-1166.
- 2) Y. Naito, K. Suetake, E. Fujiwara, and M. Sato: "The characteristics of the Ferrite Absorbing Wall", Trans. Electronics Comm. Engrs, Japan, Pt. B, **J 52-B**, **1**(1969)26-30.
- 3) O. Hashimoto: Denpakyuusyutaino hanashi, Science and Technology, (2001)10-18.
- 4) Y. Shimizu: Saisin Denzihano Kyuusyuto Shadan, Nikkei Kizyuthu Tokyo, (1999)3-18.
- 5) Y. Kotsuka: "Advanced EM-wave Absorber Technologies", IEICE Trans., **88-12**(2005)932-936.
- 6) Y.J. An, K. Nishida, T. Yamamoto, S. Ueda, and T. Deguchi: "Microwave Absorber Properties of Magnetic and Dielectric Composite Materials", IEEJ Trans. FM, **128-6**(2008)441-448.
- 7) A. Nishikata: "On the Influence of Specimen Size and Antenna Distance or Beam Convergence for the Reflection loss Measurement of Wave Absorber by Free Space Methods", IEICE Trans., **88-12**(2005-12)943-955.
- 8) D.K. Ghodgaonkar, V.V. Varadan, and V.K. Varadan: "Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies", IEEE. Trans. Instrum. Meas., **39-2**(1990)387-394.
- 9) Y. Konishi: Microha Kairono Kisoto Sonoouyou, Sougoudenshis Publishing Co., (1990)1-99.
- 10) O. Hashimoto: Denpakyuusyutaino hanashi, Science and Technology, (2001)43-66.
- 11) K. Hatakeyama, M. Hosokawa, Y. Sakai, H. Togaya, and K. Yamaguchi: "Study of Reflection Coefficients of Circularly Polarized Plane-Wave Incidence", EMCJ **102-12**(2001)85-90.
- 12) O. Hashimoto and T. Abe: FDTD Zikan Ryouiki Sabunhou Nyumon, Morikitasuyuppan, (1996).
- 13) H. Eraba and O. Hashimoto: "A Study on Modeling of the Resistive-film using Approximate Equation of the Resistive-film for FDTD Analysis", IEICE Trans. B, **J 83-B**, **12**(2000)748-751.
- 14) Y. Naito: "The Past and Present of My Research on the Electromagnetic Wave Absorber", IEICE Trans., **82-9**(1999)938-942.
- 15) M. Chino, Y. Nikawa, K. Kikuchi, T. Yamamoto, and A. Yamamoto: "Radio Absorptive Properties of $r\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and TiO_2 Composite Materials (Part 3)", EMCJ **96-57**(1996)67-74.
- 16) S. Kanbara: Gousei Gomu Handbook, Asakura Publishing Co., (1979)323-329.
- 17) M. Chino, Y. Nikawa, B. Okuda, and Y. Yoshida: "Measurement of Complex Permittivity of Ferrite Absorbers by means of Open-Short Circuit with Coaxial line", EMCJ **91-59**(1991)7-14.
- 18) M. Saito, T. Yamamoto, T. Sakamoto, H. Niori, M. Chino, and M. Kobayashi: "Single-layer Type Microwave Absorber Made of Magnetic-Dielectric Composite Materials", Ferroelectrics, **263**(2000)9-12.
- 19) T. Weiland: "A Discretization Method for the Solution of Maxell's Equations for Six-Component Field", Electronics and Communication (AEU), **31**(1977)116.
- 20) K. Kashiara, N. Fujita, H. Hashimoto, Y. Ijiri, K. Hosotani, T. Mitsui, and T. Kudo: "Development of the Sheet-Type Electromagnetic Wave Absorber for ETC/DSRC", Mitsubishi Cable Industries Review, **99**(2002)69-77.
- 21) Anritsu Co.: WILTRON 360B Vector Network Analyzer

- System, (1992).
- 22) H. Kurihara, A. Nishikata, Y. Higashida, T. Takahashi, and O. Hashimoto: "A Study on Measurement Method for Reflectivity of Electromagnetic Absorber in Millimeter Wave (Part 1) – Standardization of Free-Space Method by using Horn Antennas", IEICE Trans., EMCJ 2004-31 (2004-07)33-40.
- 23) H. Shirai, T. Ishikawa, and Y. Watanabe: "A Study on Radar Cross Section Measurements in an Anechoic Chamber", T.IEE Japan, 117-5(1997)531-536.
- 24) T. Mitsui, T. Ashida, K. Hosotani, T. Kudo, and K. Kashiara: "Development of Advanced Wave Absorber for Electronic Toll Collection System", Mitsubishi Cable Industries Review, 98-10(2001)1-11.
- 25) R.C. Buchhanan: Ceramic Materials for Electronics, Marcel Dekker, INC, (1986)84-86.
- 26) W.D. Kingery, H.K. Bowen, and D.R. Uhmman: Introduction To Ceramics, Uchida Rokakuho Publishing Co., LTD., (1981) 912-913.