

Study on Development of Thin Type Electromagnetic Wave Absorbers using Frequency Selective Surface and Their Application to Improvement of Radio Frequency Identification Communication

Takahiko YOSHIDA*^{1,2}, Masato MATSUSHITA*², Haruhide OKAMURA*², Shinzo YOSHIKADO*¹

(Received April 1, 2019)

A thin frequency selective surface pattern electromagnetic wave absorber consisting of a pattern conductor layer, a magnetic layer, a dielectric layer, and a back reflector was used as an electromagnetic wave absorber, and the absorption center frequency was designed to be 950 MHz band. A thin electromagnetic wave absorber with less than 1 cm was fabricated and the electromagnetic wave absorption performance was measured by the free space method. As a vertical panel using the developed thin electromagnetic wave absorber, the received power was measured at each point of transmitted electromagnetic waves from the reader antenna in the wireless communication environment of the radio frequency identification (RFID) system. Furthermore, the reading rate of the RFID tag placed was also measured. Reflected waves from the walls and floor that were observed remarkably when the electromagnetic wave absorbing panel was not installed and their effects could be suppressed and the successful reading rate of the tag could also be improved.

Key words : electromagnetic wave absorber, pattern absorber, conductor pattern, UHF band RFID, tag reading rate

キーワード : 電磁波吸収体, パターン吸収体, 導体パターン, UHF 帯 RFID, タグ読取率

Frequency Selective Surface を用いた薄型電磁波吸収体の開発と Radio Frequency Identification 通信改善への応用に関する研究

吉田 隆彦, 松下 正人, 岡村 東英, 吉門 進三

1. まえがき

電磁波吸収体は不要な電磁波を吸収して熱に変換することから、電磁波環境を実際に改善することが可能である¹⁾⁶⁾。インフラ内での電磁波環境の改善を行う場合、使用される電磁波吸収体の量が多くなるため、軽量かつ薄型が望ましい。軽量・薄型化を目指したいくつかの電磁波吸収体が開発されて

きた。その中で平板形状吸収体の入射側表面に導体薄板を複数個配列した導体パターン層（以後、パターン層）、吸収体内部の吸収層、後部に反射層を備える薄型電磁波吸収体が提案されている。特に周波数選択性を持つ Frequency Selective Surface (FSS) として機能する周期的に配置された複数の導体共振パターン層を有する平板型電磁波吸収体をここ

*¹Department of Electronics, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6687, FAX: +81-774-65-6801, E-mail: syoshika@mail.doshisha.ac.jp

*²Technical Center, Nitta Corporation, Nara

ではパターン吸収体と呼ぶことにする。FSS は薄い誘電体フィルムに特定の周波数に共振するパターンを多数周期的に設けることで、入射する特定周波数の電磁波に対して共振アンテナ素子として電磁波の反射や再放射などの機能を示す。これまでにパターン吸収体についての多数の報告がある⁷⁻¹³⁾。著者らは FSS 機能を持つパターン層の形状等を最適化するために種々のパターン吸収体の設計・作製を行ってきた。さらに設計の指針を明確化するためにパターン吸収体の吸収機構を解明する必要があると考え、FD-TD 法 (Finite-difference time-domain method) を用いたシミュレーション解析により電磁界分布を求め、パターン吸収体による入射電磁波の反射等について解析を行ってきた。その結果、解析値と実測値がほぼ一致することを報告した¹²⁾。また FD-TD 法で得られた空間の電磁界分布より時間平均ポインティングベクトルを求めて電磁波の電力の流れを知ることができる。著者らは 2.4 GHz 帯パターン吸収体に対する入射後の電磁波の電力の流れを解析した¹³⁾。これにより、パターン導体に垂直に入射した電磁波の電力は、パターン面状に沿って水平方向に流れて共振器構成となるパターン吸収体内部の吸収層に流れ込むことが示され、その結果、パターン吸収体の入射電磁波に対する共振長を水平向きに変えることができることになり、垂直方向の長さ (吸収体の厚さ) を大きく低減しても整合が可能となり、電磁波吸収が可能であることが明らかにされた。パターン吸収体は吸収周波数選択層と吸収した電磁波を熱に変換する吸収層の機能が別々であるために設計に柔軟性がある。例えば、吸収中心周波数 (f_0) を変化させる場合には主にパターン層のパターンサイズを変化させれば良い。一方、パターン層をもたない電磁波吸収体では、入射した電磁波は入射面に対して垂直方向に電力の流が起こるために、入射波に対して整合を取るためには、それに適した厚さが必要となる。さらに、整合と吸収が同じ部分で行われるために、吸収層の厚さと複素誘電率や複素透磁率の材料定数が相互に関連するために設計の自由度がパターン吸収体と比較して低くなる。結果として、 f_0 を変化させるためにはそ

れに応じて材料定数および厚さを変化させる必要がある。また f_0 を一定にして厚さを薄くしたい場合、十分な吸収量を確保するためには材料の質量密度が大きくなる。すなわち、パターン層をもたない電磁波吸収体では軽量化と薄型化が二律背反の関係がある。

パターン吸収体のパターン層は f_0 における表皮深さより厚い数十マイクロメートル程度のうすい金属箔で構成されるために軽量である。また吸収層は導電性のカーボン粉末フィラー等を樹脂やゴム材に分散させることにより軽量化が可能である。また作製が容易であるために生産性に優れている。本研究の目的は、以上に述べたパターン吸収体の特徴を生かして、これまで提案したその設計方法を用いて、現行の UHF (Ultra High Frequency) 帯 RFID (Radio Frequency Identification) 通信周波数帯域の電磁波を吸収できる薄型・軽量であり、さらにパターン形状に工夫を加え吸収帯域幅の広いパターン吸収体を設計・作製し、それを用いて RFID 無線通信の読み取り率の改善効果を実験的に検証することである。

長距離通信が可能なパッシブタイプのタグを用いる UHF 帯 RFID システムが普及するには、日本や EU (European Union) などの RFID に対する認可周波数帯域が狭い場合は電磁波干渉の問題を解決しなければならないことが明らかになっている。UHF 帯 RFID システムは 2005 年に 950 MHz 帯が割り当てられ、パッシブタイプのタグを用いてリーダーとの間で約 5 m の無線長距離通信を可能とした。RFID のリーダーゲート部にて多数の荷物に貼付された各タグの一括読み取りが可能であるため、物流業界の荷物のトレーサビリティ管理などでの利用が拡充している。なお使用周波数は 2012 年より 920 MHz 帯の専用帯域に移っている。

RFID は物流倉庫や配送センターなどは倉庫などの大容積の空間内において使用されることが多い。その建築物や設備に金属構造物や金属複合体などが多く存在するため、無線通信を行う場合には反射波が発生しやすい環境である。また RFID システムでのゲート部の幅は一般に約 3 m 未満であるが、一方向からの電磁波の送信では荷物の影になるエリ

アに貼られたタグが読み取れないために、異なる角度から電磁波を照射するように複数のリーダアンテナがゲートを通過する荷物に向けて配置され、電磁波が干渉しやすい環境になっている。電磁波干渉対策とタグの正しい読み取り率の向上のためシステムメーカーを中心に読み取り機からの通信方法などで様々な検討がなされたが、空間の電磁波干渉を物理的に減少させる方法は限られている。その中で電磁波吸収体の利用は有効な手段となる¹⁴⁻¹⁶⁾。電磁波吸収体は建築物の内壁や床の表面、また床面上に設置されるパネル等としての使用が想定される。したがって内壁や床の上では軽量性と高い強度が、パネルでは軽量・薄型化が要求される。軽量・薄型化の両方を目的とした研究が報告されている。例として岡野等は $\lambda/4$ 型電磁波吸収体に正方形導体パターン層をリアクタンスとして機能させることに薄型化を図って、効果を実証しているが一桁等の劇的な薄型化には至っていない¹⁴⁾。西田等は UHF 帯 RFID 周波数 (953 MHz) 用に設計した透明な $\lambda/4$ 型電磁波吸収体を用いて、RFID タグ読み取り試験を含む多岐に渡る試験を行い、所望の通信エリアが確保できることを報告している¹⁵⁾。しかし、この型の電磁波吸収体は 953 MHz では厚さが約 79 mm と厚く、屋内に大面積に使用する場合の占有体積の大きさが問題となる。また、倉橋等は薄型化を目的として磁性材料/誘電材料/裏打ち金属を積層した、約 10 mm 厚の導体パターン層をもたないとする薄型多層型電磁波吸収体を床面に設置して通信領域測定を行い、電磁波吸収体の有効性を検証している¹⁶⁾。しかし前述のように、パターン層をもたない薄型多層型電磁波吸収体を当該周波数で約 10 mm 厚で実現することは極めて困難であることや、倉橋らの報告においても詳細な構造や構成材料の材料定数などが明確に示されていなかった。そこで、本研究では 950 MHz での RFID タグの正しい読み取り率の改善への使用を目的とし、従来の課題を克服するために、この周波数帯で薄型であり、平均質量比重が極めて小さく軽量であり、用途を考慮して高い強度をもつパターン吸収体を設計・作製し、改善効果等を実験的に検証したので報告する。本研究と類似の

パターンをもつ吸収体の設計・作製に関する報告が著者らにより報告されているが、本研究で使用したパターンはそれらを発展・最適化したものである¹⁷⁾。またそのパターン吸収体を使用した RFID タグの正しい読み取り率の改善を実証した報告はまだない。

なお、本研究では 950 MHz での RFID タグへの使用を目的とした研究内容であるが、パターンサイズの軽微な変化により容易に現行の使用される周波数である 920 MHz 帯に対応可能である¹³⁾。

2. 実験方法

2.1 吸収特性の評価

空気中に置かれた平板状吸収体試料の空気・試料界面における反射損失 (以後、リターンロス) R_L は以下の式で与えられる。

$$R_L = 20 \log_{10} |\Gamma_d^*| \quad (1)$$

ただし Γ_d^* は空気・試料界面における複素電圧反射係数であり (2) 式で与えられる。

$$\Gamma_d^* = \frac{Z_s/Z_0 - 1}{Z_s/Z_0 + 1} \equiv \frac{z_s - 1}{z_s + 1} \quad (2)$$

ただし、 Z_0 は空気中の特性インピーダンス ($\approx 377 \Omega$)、 Z_s は空気・試料界面における試料側を見た入力インピーダンス、 $z_s (=Z_s/Z_0)$ は試料前面における Z_0 で規格化した規格化入力インピーダンスである。電磁波吸収体の無反射条件は $z_s = 1 + j0$ である¹⁸⁾。この z_s をパターンサイズおよびパターン間隔で制御する設計方法を著者は提案している。電磁波吸収体の吸収性能を、入射電磁波の電力を 99% 以上吸収 (リターンロスが -20 dB 以下) する周波数帯域幅 Δf を吸収中心周波数 f_0 で規格化した -20 dB 規格化吸収周波数帯域幅 $\Delta f/f_0$ により評価した。

磁性体層および誘電体層の材料定数である複素誘電率および複素透磁率の周波数特性の測定値を行い、シミュレーション解析に使用した^{12,13,18)}。

2.2 パターン吸収体の設計

Fig.1 に示すように入射側表面から順に表面パターン層と吸収層である磁性体層、誘電体層および後面反射層を積層して組み合わせたパターン吸収体

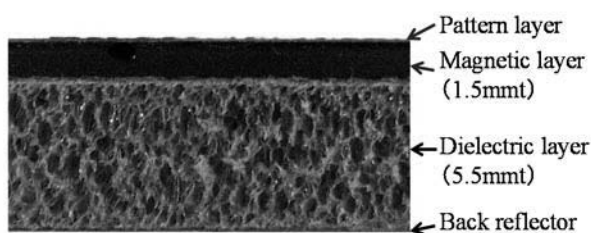


Fig. 1. Optical microscope image of cross sectional view for a pattern absorber.

を設計・作製した. Fig.2(a)に導体パターン層のパターン形状, サイズ, 配置を示す. パターンのエッジ間隔を変化させることにより z_s が大きく変化するとともに吸収中心周波数も変化する^{12,13}. エッジ間隔が連続的に異なる形状とするために曲率半径の異なる方形状パターンと十字状パターンを組み合わせた Fig.2(a)に示すパターン形状はすでに報告されているが¹⁷, さらに吸収特性が向上するようにそのパターン形状を最適化したことが本研究での新しい試みである. このパターン吸収体を用いて作製した吸収体パネルを Fig. 2(b)に示す.

以下に吸収体の作製手順を示す. アルミニウム箔をコーティングした PET (Polyethylene terephthalate) フィルムのアルミニウムをエッチングすることによりパターンを形成した. 磁性体層としてのマンガナー亜鉛フェライトを混練した PVC (Polyvinyl chloride) 樹脂層, 誘電体層としての発泡ポリプロピ

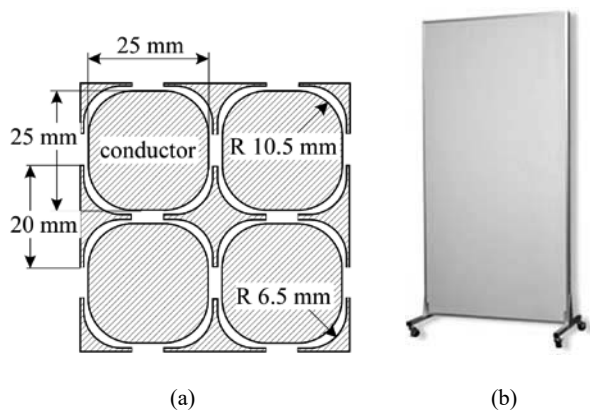


Fig. 2. (a) Pattern shape designed for the UHF band pattern absorbers and (b) photograph of a pattern absorber panel.

レン樹脂であるゼットロン (積水化学工業), 後面反射層としてのアルミニウム箔を積層した PET フィルムを接着剤で接着して一体積層化した.

反射特性は TLM 法 (Transmission Line Matrix : 伝送線路行列法) を用いて評価し, 電磁界分布は FD-TD によるシミュレータ (Computer Simulation Technology AG 製 MWSTUDIO) により求めた^{12,13,19,20}. 吸収層の材料定数は実際に作製可能な材料のものでなければならない. それらをデータベース化したものから種々選択し, 吸収中心周波数が約 950 MHz となるように, 繰り返し反射特性の計算を行い Fig.2(a)に示す導体パターン層の各部寸法, 磁性体層 (950 MHz の材料定数 $\mu_r' = 2.43, \mu_r'' = 1.21, \epsilon_r' = 15.85, \epsilon_r'' = 1.03$), 誘電体層 (ゼットロン. 950 MHz の材料定数 $\mu_r' = 1.0, \mu_r'' = 0, \epsilon_r' = 1.12, \epsilon_r'' = 0.003$), それらの厚さを決定した. また吸収体のリターンロス R_L の周波数特性の計算値と比較するため, 実際に作製したパターン吸収体の電磁波吸収特性を Fig.3 に示す装置を用いてフリースペース法により測定した.

2.3 RFID システム

本研究で使用した UHF 帯 RFID タグは市販品である. 10 枚のタグを, 通信距離を変えて読み取り率と受信感度を測定して無線通信でのタグの起動電力を評価した. Fig. 4 に示すように, タグ通信の読

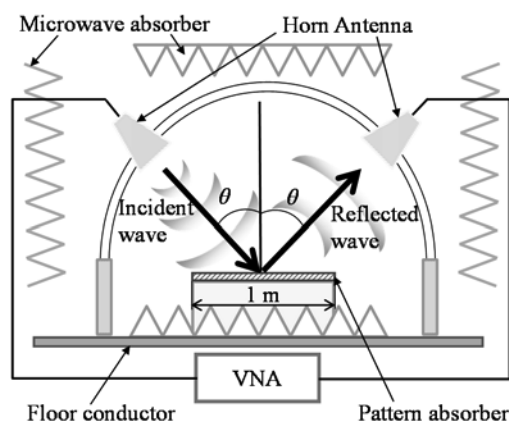


Fig. 3. Apparatus for measurement of absorption characteristics by the free space method.

み取り率が100%となるために必要な起動電力の閾値は、通信距離に関係なく41.3 dB μ Vであった。なお本研究で使用したRFIDタグシステムのすべての無線通信実験を電波暗室で実施した。電波暗室は標準仕様として床面が金属であるため、そこでの電磁波の反射が生じるのでその影響を確認し、また影響を低減するための電磁波吸収体の設置効果を検証した。電磁波発生源としてパッチアンテナ構成のリーダーライタTFU-RW351(富士通)を使用して実験における送信出力を74.9 dB μ Vとした。受信電力はダイポールアンテナ(アドバンテスト, TR1722)を用いて、EMI(Electromagnetic Interference)テストレーバESS(Rohde & Schwarz)を使用して評価した。なおテストレーバの表示単位はdB μ Vであるが、入力インピーダンスを電力計算の基準として電力換算が可能であるため、電力比較値として扱っている。

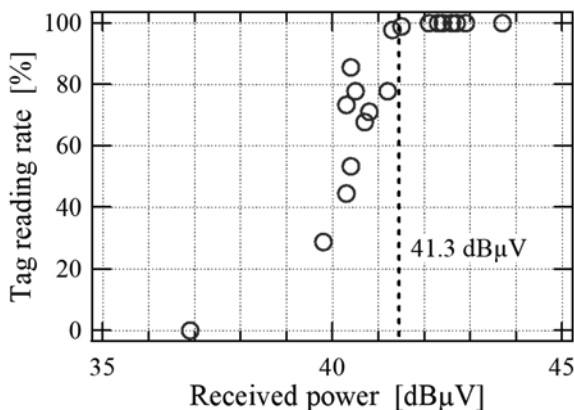


Fig. 4. Received power required to activate tag communication.

3. 実験結果および考察

3.1 パターン吸収体の吸収特性

シミュレーションにより得られた電磁波吸収特性は、 f_0 の想定値に近い例として f_0 が約972 MHz、 f_0 における z_s の実部 $z_{sr} = 0.871$ 、同虚部 $z_{si} = 0.016$ 、 R_L は約-24 dB、 $\Delta f/f_0$ は約3.9%であった。また f_0 が985 MHzのとき R_L は約-32 dB、 $\Delta f/f_0$ は約4.5%であった。正方形パターンでは $\Delta f/f_0$ は最大でも約2.7%であるので、本研究で使用したパターン

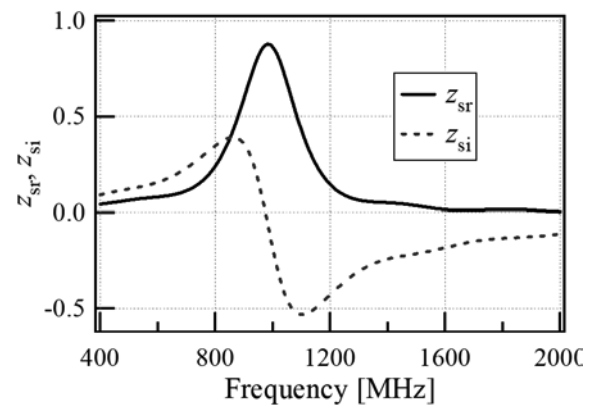


Fig. 5. Frequency dependence of z_{sr} and z_{si} for designed and fabricated pattern absorbers.

を用いることにより約1.4倍以上帯域幅が広がることが分かった。しかし、 $f_0 = 972$ MHzは想定した950 MHzより約2%高周波数側にシフトした。このずれは以下の理由によると考えられる。2.2節で述べたように、実際に作製することを考慮して吸収層の材料定数は種々の組成の実測値をデータベース化したものから選択し、さらにパターン層の各部寸法、磁性体層、誘電体層の材料定数およびそれらの厚さを変化させて吸収中心周波数が約950 MHzとなるように、絞り込みを行うのであるが、それらの値の最適化が不十分なために生じたずれである。各値をさらに細かく変化させることにより想定値への絞り込みは可能である。設計したパターン吸収体の z_s (z_{sr} および z_{si})の計算値の f_0 近傍における周波数依存性をFig. 5に示す。 z_{si} が0のときに z_{sr} が最大となり1に近づいた。この周波数特性は典型的な並列共振器のものと酷似しており、パターン吸収体が並列共振器であるアンテナの集合体としての特徴を示していると考えられる。またリターンロス R_L の周波数特性の計算値と、実際に作製したパターン吸収体の電磁波吸収特性をFig. 3に示す装置を用いてフリースペース法により測定した結果と比較したものをFig. 6に示す。吸収特性の実測値は計算値とおおむね一致した。 f_0 は約953 MHz、 $R_L = -26$ dB、 $\Delta f/f_0$ は約5.0%でありシミュレーション値よりも帯域幅が広がった。 f_0 の実測値は、シミュレーションで得られた値972 MHzより約2%低周波

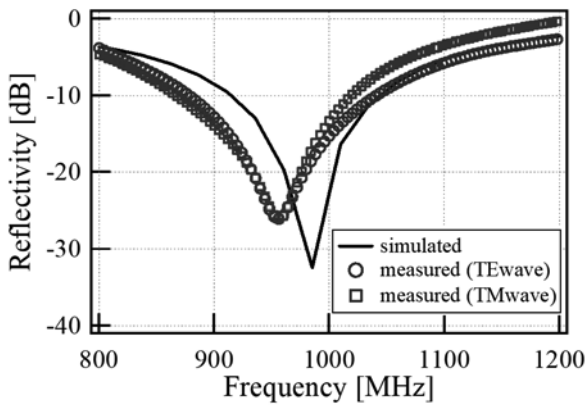


Fig. 6. Frequency dependence of R_L for pattern absorbers.

数側にシフトした。このずれは以下の理由によるものと考えられる。パターンサイズは高精度に加工することは可能であるので、ずれの原因として材料定数のずれや接着層による厚さのずれが考えられる。吸収層は導体パターンの下部にあるためにその誘電率による共振波長短縮効果により電磁波吸収体に侵入した電磁波の共振波長を変化させると考えられる。そこで材料定数の変化が f_0 に及ぼす影響をシミュレーションにより調べた結果 f_0 の約 20 MHz のずれは材料定数が 1 % 程度で生じることが分かった。したがって吸収層の材料の均質化や組成のずれも改善することが必要である。また、厚さのずれも f_0 に影響を及ぼすことが確認された。接着層は、その厚さと接着剤の材料定数が既知であれば設計の際に考慮することは可能であるが、本研究では行っていない。Fig. 6 の実測結果は 920~990 MHz の周波数範囲で 15 dB 以上の吸収量を示し、 f_0 が設計値からずれた場合でも RFID 通信帯域において有効に機能すると考えられる。

Fig. 3 に示す装置を用いて斜入射吸収特性を測定した TE 波の斜入射時の R_L の実測値を Fig. 7 に示す。入射角度が増加すると吸収量が小さくなり、且つ高い周波数側に f_0 はシフトしたが、入射角が 10°~45° までの範囲において、953 MHz 周波数にて約 15 dB 以上の吸収量が得られた。45°~90° の範囲の測定は行われていないが、パネル型の吸収体の場合には配置を工夫することに斜入射波についても吸収性能を劣化させないことが可能であると考えら

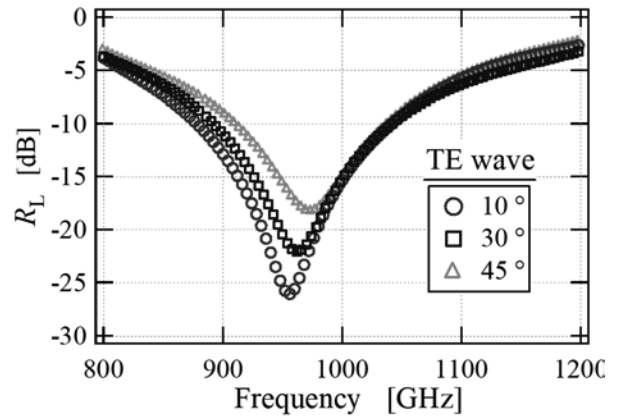


Fig. 7. Frequency dependence of R_L for oblique incident angle.

れる。以上より、得られた 953 MHz に吸収周波数を持つパターン吸収体を次節からの RFID の通信読み取り率改善の評価実験に使用することにした。作製した UHF 帯パターン吸収体の全厚 d_{tot} は約 7.5 mm ($d_{tot}/\lambda_0 = 0.0238$, $\lambda_0 : f_0$ での波長)、重量は 4.6 kg/m²、平均質量比重が約 0.6 g/cm であった。厚さは西田ら報告している $\lambda/4$ 型電磁波吸収体の約 1/10 の薄さである¹⁵⁾。

Fig.8(b)に Fig.8(a)に示すような Fig.2(a)の導体パターンを単純化した辺長が L の正方形パターンを有するパターン間間隙が W のパターン吸収体に平面波電磁波が垂直に連続的に入射した場合の定常状態に達した後の吸収体上空と内部における時間平均ポインティングベクトル \mathbf{S} の電力の流れを示す実数部 $\text{Re}(\mathbf{S})$ の模式図を示す¹³⁾。 \mathbf{S} は次式で与えられる。

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \tag{3}$$

ただし、 \mathbf{E} は電界の強さのベクトル、 \mathbf{H}^* は磁界の強さのベクトルの複素共役、 \times は \mathbf{E} と \mathbf{H}^* のベクトル積である。Fig.8(b)に示すように、定常状態ではパターン吸収体に垂直に入射した電磁波は流の向きをパターン近傍で水平方向に変えて、パターン導体の間隙から共振器構成の吸収体内部に入るように見える。水平方向の電力の流れはパターンのエッジが入射電磁波により線状 2 次波源となり線の動径方向に電磁波を再放射するために生じる。再放射波の存在は、正弦波 10 波をパターン吸収体に入射させ

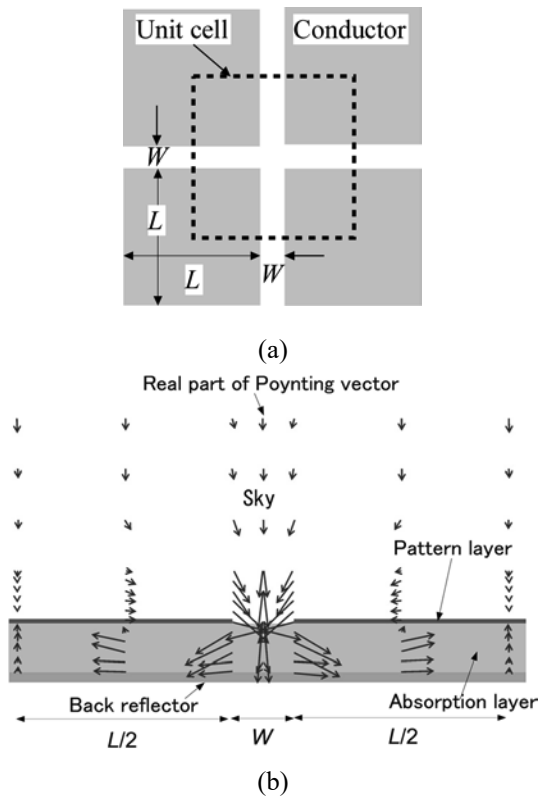


Fig. 8. (a) Pattern shape and (b) schematic drawing of Poynting vectors.

シミュレーション解析によりその動的挙動を観察することにより確認された。再放射波の波動ベクトルは吸収体表面の垂直方向以外に成分をもち、これが入射波および導体面や間隙部での反射波と干渉して、結果的に吸収体表面近傍で水平方向の電力の流れが生じるように見える。吸収体上空では表面から $1/4\lambda$ 程度離れると電磁界の乱れは、非伝播モードのように、解消される。パターン吸収体の欠点の一つとして、表面にパターンがあるために近傍界と遠方界が異なる。しかし Fig.8(b)に示すように入射電磁波の波長 λ の $1/4$ 以上離ればほぼ完全に遠方界に移行する¹³⁾。950 MHz 帯ではパターン層から約 8 cm 離れば遠方界となるので、実使用では遠方界のみを考慮すればよい。なお、電力の流れの解析に正方形パターンを用いた理由は線状波源が直線となり電力の流れが明確化されるためである。Fig.2(a)の導体パターン形状は曲線部が多く複雑であるために、 S を求める部位の点数が飛躍的に多くなるために現時点では行っていない。しかし、それ

ぞれのパターンについての吸収特性とパターンサイズやパターン間隙幅との関係は類似しているの、吸収機構は原理的に同じであると考えられる。以上より、パターン導体の表裏でその電磁波に共振する長さを水平方向に確保できるため吸収体の厚さを薄くできる。Fig.2(a)の導体パターンをもつ吸収体の吸収帯域幅は形状がより最適化されたことにより、正方形パターンを有する吸収体よりも広くなった。パターンの設計においては後面反射層と平行に位置してパッチアンテナとして機能する方形パターンが存在が重要であり、十字状パターンは方形パターン共振周波数を下げる役割も担っていることを確認した。

また誘電体層は発泡体であるが、Fig.1に示すように、その厚み方向に発泡構造が並んでいる構造を採用したため板面に対して垂直方向に剛性を保つことができ、実用上十分な耐衝撃性や強度を備え、床面に敷設したパターン吸収体の上を人が歩くことも可能であった。

3.2 パターン吸収体のパネル化

さらに使いやすいようにパターン吸収体を Fig.2(b)に示す縦型パターン吸収パネルに加工した。0.9 m×1.8 m のパネル寸法での重量は約 7.5 kg であり軽量であった。またレイアウト変更の容易さや仮に倒れても災害に繋がるリスクは小さいことが確認された。

4. RFID 通信改善の検証

4.1 床面反射の影響

電波暗室内での RFID システムを稼働させると、リーダアンテナから連続照射される電磁波は進行波となって空間部へ広がる。Fig.9に種々の条件についてテストトレシーバ ESS で評価した受信電力とリーダアンテナからの距離の関係を示す。電磁波吸収体を設置しないとき、図中の○のプロットで示したように床面(金属面)からの反射波と進行波との干渉による定在波の発生が観測された。床面上に Fig.10 および Fig.11 に示すように、(A) ピラミッド型電磁波吸収体(幅: 2.4 m)あるいは、(B) パタ

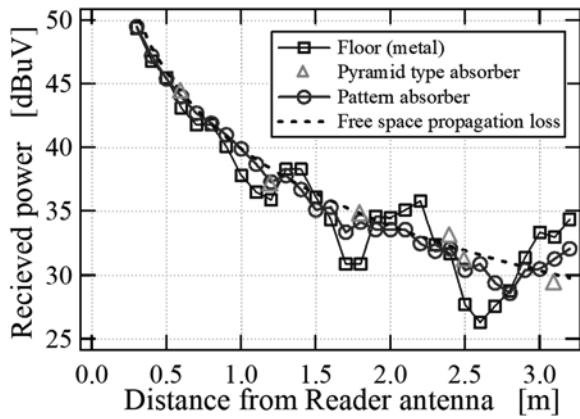


Fig. 9. Relation between received power and distance from reader antenna for various circumstances.

ーン吸収体（幅: 1.8 m）をリーダアンテナと受信アンテナ間に設置して、同じ高さの空間での電力値を距離別に測定した¹⁵⁾。その結果、吸収体を設置することにより定在波はほぼ消失し、発振源であるリーダアンテナからの距離に応じて、受信電力が自由空間伝搬損失（Free space propagation loss）の挙動に從

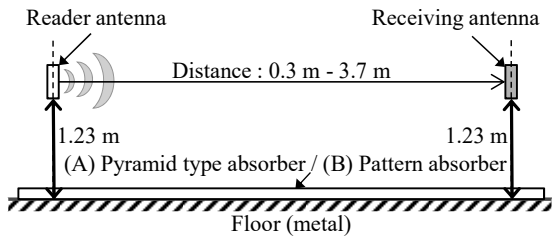


Fig. 10. Experimental arrangement for measurements of received voltage with or without electromagnetic wave absorber put on the floor in the radio anechoic chamber.

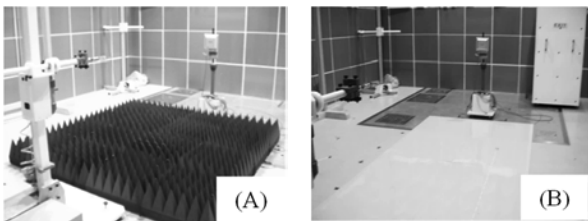


Fig. 11. Photographs of electromagnetic wave absorbers used for evaluation. (A) Pyramid type absorber, (B) Pattern absorber.

って減衰する電磁波干渉抑制効果が確認された。干渉抑制効果としてはピラミッド型電磁波吸収体の方が大きいものの、パターン吸収体も最大ゲート間隔に相当する 3 m までの距離では十分に抑制する効果を示した。

4.2 対向金属板反射試験およびタグ読取試験

Fig. 12 に示すようにリーダアンテナから 2.5 m 離れた位置に、リーダアンテナと対向する態様で金属板（アルミニウム板、0.9 m×1.8 m）を 3 枚横並びで立てて反射波を生じさせ、定在波発生 of の状況を知るためにテストレーバ ESS で受信電力を評価した。次に Fig. 12 および Fig. 13 に示すように金属板の 0.2 m 手前に Fig.2(b) に示したパターン吸収パネルを 1 枚あるいは 2 枚を横並びにして立てたところ、Fig.

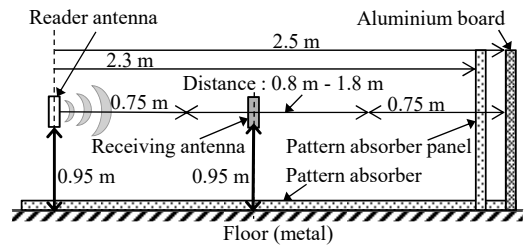


Fig. 12. Experimental arrangement for measurements of received power with or without pattern absorbers stood in front of aluminum plate reflectors in the radio anechoic chamber.



Fig. 13. Photograph of experimental set up shown in Fig. 12.

14 に示すように進行波と反射波による電磁波干渉が抑制された。パターン吸収パネルがない場合は進行波の半分の波長の定在波が発生し、その振幅は金属板に近いほど大きくなった。それに対して、パターン吸収パネルを立てることで、発生定在波の振幅が大幅に抑制されることがわかった。

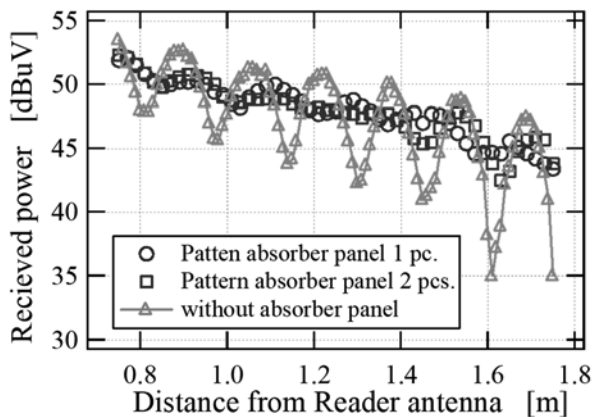


Fig. 14. Relation between received power and distance from reader antenna with or without pattern absorbers stood in front of aluminum plate reflectors in the radio anechoic chamber.

4.3 ゴーストリード試験

RFID システムにて設定された読み取り領域を超えてタグを読み取るゴーストリードが問題になっている。Fig. 15 に示すようにリーダアンテナから 1.5 m (タググループ 1) および 3 m 離れた位置 (タググループ 2) にタグを置き、読み取り度合を評価した。タググループには 9 枚のタグを貼り、左上から右に約 20 cm 間隔に貼ったタグに No.1, No.2, No.3 と付番し、その下約 20 cm 離して貼ったタグに No.4, No.5, No.6, さらに約 20 cm 下部に貼った No.7, No.8, No.9 の各タグを配置している。パターン吸収パネルがない場合、タググループ 1 についてはすべて正しく読み取ることができ、さらにタググループ 2 については 2 枚正しく読み取れて、1 枚が読めたりあるいは読めないという状況であった (No.4, No.8, No.9)。この不安定な読み取りの 1 枚のタグは起電力の閾値付近の電力を得ていることによる不安定さを示した。次にリーダアンテナから 2.5 m 離れた

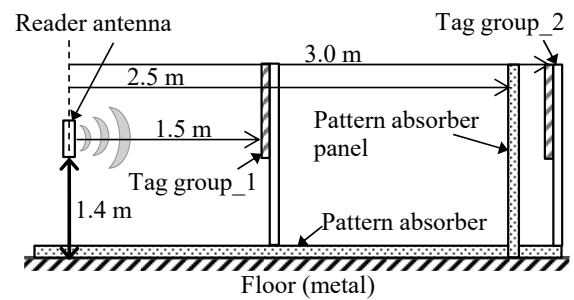


Fig. 15. Experimental arrangement for measurements of reading rate of tag groups 1 and 2 with or without pattern absorbers put on the floor and stood in front of tag group 2 in the radio anechoic chamber.

(A) Without absorber



(B) With absorber



Fig. 16. Photograph of experimental set up for measurements of tag reading rate shown in Fig. 15.

Table 1. Evaluation result on tag reading test.

	Tag No.	Without pattern absorber panel		With pattern absorber panel	
The number of read Tag	-	11 or 12		9	
Tag group	-	1	2	1	2
Reading result S : Successful I : Intermediate F : Failed	No.1	S	F	S	F
	No.2	S	F	S	F
	No.3	S	F	S	F
	No.4	S	I	S	F
	No.5	S	F	S	F
	No.6	S	F	S	F
	No.7	S	F	S	F
	No.8	S	S	S	F
	No.9	S	S	S	F

位置にパターン吸収パネルを設置した場合 (Fig. 15 および Fig. 16 (B)) はタググループ 1 についてはすべてを正しく読み取ることができたが、一方タググループ 2 については全く読み取ることができず、タグ読み取り領域を制限するゾーニングを行うことができた。(Table 1) パターン吸収体は後面反射層を備えているため電磁波遮蔽体としても機能する

が、他側面は電磁波吸収構成であるため、金属板の場合と異なり特定周波数の電磁波に対しては反射波が生じない。これにより反射波が発生するような環境に於いても、電磁波干渉を低減させて電磁通信環境を改善した RFID タグ通信領域を設計・設置することが可能となった。

5. まとめ

- (1) 導体パターン形状、積層構成を最適化することにより、950 MHz 帯の周波数の電磁波を吸収する薄型 (7.5 mm 厚)・軽量 (4.6 kg/m², 平均質量比重: 約 0.6 g/cm³) の電磁波吸収体 (パターン吸収体) を開発した。
- (2) シミュレーション解析による入射電磁波の 99 % 以上を吸収できる規格化帯域幅は約 3.9 % また実測で約 5.0 % となり、パターン形状を最適化することにより広帯域化することが分かった。
- (3) さらに強度が高く良好な斜入射電磁波吸収特性を有することから、本パターン電磁波吸収体を床材および縦型パネルとしたところ、RFID 通信試験にて金属板からの反射波により生じる定在波を抑制することができ、信号受信が安定化し、正しいタグ読取率が向上した。これにより RFID 無線通信品質を大幅に改善できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Y. Naito, K. Suetake, "Application of Ferrite to Electromagnetic Wave Absorber and Its Characteristics", *IEEE Trans. Microwave Theory and Technique*, **19**, 65–72 (1971).
- 2) K. M. Lim, K. A. Lee, M. C. Kim, C. G. Park, "Complex Permeability and Electromagnetic Wave Absorption Properties of Amorphous Alloy-Epoxy Composites", *J. Non-Crystalline Solids Soc.* **351**, 75–83 (2005).
- 3) K. Sakai, Y. Wada, S. Yoshikado, "Composite Electromagnetic Wave Absorber Made of Permalloy or Sendust and Effect of Sendust Particle Size on Absorption Characteristics", *PIERS Online*, **4**, 846–853 (2008).
- 4) Y. Wada, N. Asano, K. Sakai, S. Yoshikado, "Preparation and Evaluation of Composite Electromagnetic Wave Absorbers Made of Fine Aluminum Particles Dispersed in Polystyrene Resin by Controlling Permeability", *PIERS Online*, **4**, 838–845 (2008).
- 5) K. Sakai, Y. Guan, Y. Sato, S. Yoshikado, "Effect of Particle Shape on Absorption Characteristics of Composite Electromagnetic Wave Absorber Made of Sendust Particles Dispersed in Polystyrene Resin", *ICC3 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **18**, 092019 (2011).
- 6) T. Yoshida, Y. Agari, S. Yoshikado, "Evaluation of Absorbing Characteristics and Thermal Contact Resistance of Electromagnetic Wave Absorbing Composite Rubber", *IEEJ Trans. FM*, **104**, 11–15 (2007) (in Japanese).
- 7) T. Ojima, "Radar Cross Section Reduction Sheet", *J. Communications Research Laboratory*, **49**, 183–184 (2002).
- 8) M. Amano, Y. Kotsuka, "A Novel Microwave Absorber with Surface-Printed Conductive Line Patterns", *IEEE MTT-S Digest*, 1193–1196 (2002).
- 9) M. Amano, Y. Kotsuka, "A Method of Effective Use of Ferrite for Microwave Absorber", *IEEE Trans. Microwave Theory and Technique*, **51**, 238–245 (2003).
- 10) T. Nagano, H. Kogure, T. Maki, N. Iwasawa, "Electromagnetic Wave Reflection-Preventing Material and Electromagnetic Wave Reflection-Preventing Method", United States Patent, 5455116 (1995).
- 11) Y. Masuda, N. Otani, H. Nakano, "Wave Absorber and Manufacturing Method of Wave Absorber", United States Patent, 7864095 (2005).
- 12) T. Yoshida, M. Matsushita, T. Kubota, S. Yoshikado, "Fabrication and Evaluation of Electromagnetic Wave Absorbers Using Frequency Selective Surface", *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, 1138–1144, IEEE Conference Publications (2016).
- 13) T. Yoshida, M. Matsushita, T. Kubota, S. Yoshikado, "Analysis of Power flow by Poynting Vectors for Electromagnetic Wave Absorbers Using Frequency Selective Surfaces", *Progress In Electromagnetics Research B*, **78**, 61–74 (2017).
- 14) Y. Okano, H. Yasui, M. Abe, R. Sato, "Development of a Multi Frequency Electromagnetic Wave Absorber Wall with Metallic Patch Element Loadings", *IEICE Trans. B*, **J89-B** [10], 2022–2034 (2006).
- 15) N. Nishida, K. Sasaki, K. Kashihara, T. Kudo, K. Hosotani, M. Fukui, "Adjusting the Interrogation Area of the UHF RFID with Electromagnetic Wave Absorbers", *R & D Review (Mitsubishi Cable Industries)*, **104**, 11–15 (2007) (in Japanese).
- 16) S. Kurahashi, H. Shigematsu, H. Katou, K. Horiuchi, M.

- Nishiuchi, M. Matsunaga, “The Development Research of UHF Band RFID Compatible Electromagnetic Wave Absorption Material”, *Research Achievements (Ehime Institute of Industrial Technology)*, **46**, 17–22 (2012).
- 17) 岡村東英, 吉田隆彦, 清原好晴, 松下正人, “電波吸収体, 電波吸収パネル構造体, 無線通信改善システム”, 公開特許公報(A), 特開 2009-59972 (2009).
- 18) 橋本修, 電波吸収体入門, (森北出版, 東京, 1997).
- 19) P. M. David, “A Frequency-Selective Surface Using Aperture-Coupled Microstrip Patches”, *IEEE Trans. Antenna and Propagation*, **39**, 1763–1769 (1991).
- 20) C. Christopoulos, *The Transmission-Line Modeling Method: TLM, (IEEE/Oup on Electromagnetic Wave Theory) 1st Edition*, (IEEE Press, NJ, 1995).