

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：82670

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14746

研究課題名（和文）無線通信の電力化を可能とした平面電波吸収体の研究

研究課題名（英文）Research on planar microwave absorber that enables power receiving of wireless communication

研究代表者

小畑 輝（Obata, Teru）

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・技術支援本部多摩テクノプラザ電子技術グループ・副主任研究員

研究者番号：50781027

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、誘電体上に金属パッチを配列した電波吸収体に着目し、底面の反射導体層にスロットを設けることにより反射抑制特性を持ちつつアンテナとして入射電波の一部を取り出せる構造の開発を行った。開発には電磁界シミュレーションを用い、シミュレーションで任意の周波数に特性を持つよう最適化できることを明らかにした。試作した開発品は反射特性-15 dB以下の電磁波吸収体であり、利得が4.8 dBiのアンテナであることを実験により示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究にて開発したエネルギー回収型電波吸収体は、電波抑制としての機能に加え、アンテナとして電力を取り出すことが可能であるため、高架下等悪環境におけるETCシステムの混信抑制などのマイクロ波帯への適用に加え、環境センサ等低消費電力デバイスの電力供給源として活用できると考える。また、ミリ波帯などの高周波問題や、空間伝送型ワイヤレス電力伝送への応用が可能であり、特に高出力の無線エネルギーを用いるシステムに対し、周辺無線機器への影響を抑制しつつ無駄となる電波を回収する技術として、電波利用の更なる拡大につながるという。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focused on a microwave absorber consisting of metal patches arrayed on a dielectric material, and developed a structure that can extract a part of the incident radio wave as an antenna while having reflection suppression characteristics by providing slots in the bottom board of conductor layer. we used Electromagnetic field simulation in the development, and the simulation revealed that the characteristics can be optimized to any frequency. The results demonstrate that the proposed structure is an electromagnetic wave absorber with a reflection characteristics of less than -15 dB and an antenna gain of 4.8 dBi.

研究分野：電磁波工学

キーワード：電波吸収体 FSS 周期構造 アンテナ

1. 研究開始当初の背景

電子機器の高度化により多種多様な無線技術が開発され、TV 放送、電子機器間通信、無線電力伝送等様々な用途で使われている。無線を利用する上で電波の干渉や混信等の問題を解決するため電波吸収体がいられ、目的となる吸収量・周波数帯や用途に合わせた形状により選択される。その中でも設置のし易さから、薄型に設計可能な周波数選択表面 (FSS: Frequency Selective Surface) を利用した電波吸収体が目目されている。FSS 型電波吸収体は主に導体層、誘電体や磁性体などの層、金属パターン層で構成され、この金属パターンの形状や配列によって電波吸収特性やその付加要素が異なるという特徴をもつ。金属パターンの大きさが波長に比例するため、主にマイクロ波帯以上の周波数帯への適用が多く、ミリ波帯や空間型無線電力伝送への応用が可能である。他方、IoT 技術の発展によりセンサ等機器の低消費電力化が進み、電源供給源として身の回りの使われず捨てられる環境エネルギーを回収利用するエナジーハーベスティングの研究開発が目目されている。その環境エネルギーには、テレビ放送波や携帯電話等の通信が含まれ、移動通信サービスや無線 LAN 等の周波数を想定した研究が盛んに行われている (Christopher R. Valenta et al, IEEE Microwave Magazine, 2014)。電波吸収体と環境発電を 1 つの構造で実現することができれば、マイクロ波環境の改善と廃棄していたエネルギーの活用が可能になる。しかし、電波吸収と環境発電の機能を合わせもった構造は研究例が見られない。

申請者はこれまで、誘電体上に周期配列された金属パッチで構成される FSS 型電波吸収体の多周波特性に関する研究を行った。密な周期配列を可能とするため円形パッチと特殊な形状のパッチを採用し、2~5 GHz の周波数範囲において任意の 3 周波に 15 dB 以上の吸収特性を持つ電波吸収体を実現できることを確認した。他方、エナジーハーベスティングの分野では、受信アンテナの複数帯域化という点に着目し、放送波や通信で用いられる複数の帯域を同時に収集することでエネルギー回収量を増加するなど、検討がされている (北沢洋一他、信学技報、2013)。電波吸収体とアンテナの異なる検討において、平面アンテナが基本となる点や高機能化・応用化の考え方やアプローチに類似点が存在するが、これらの機能の複合化に着目した報告は見られない。

本研究では、FSS 型電波吸収体を基本構造とし、図 1 に示すように地板にスロット、電波吸収体直下に導波路を構成した構造を提案する。平面波入射特性を電磁界解析により求め、金属パッチなどの形状の違いによる特性変化の影響や、スロットのエネルギー回収に及ぼす影響について明らかにする。電波吸収特性を持ちつつエネルギーを取り出す技術を確認する。

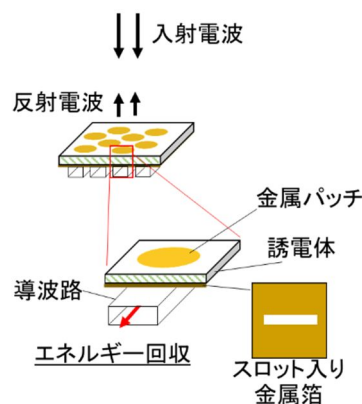


図 1 提案基本構造

2. 研究の目的

本研究の目的は、金属パッチを周期配列した FSS 型電波吸収体を用い、提案する構造を適用することにより入射された電波の回収が可能であることを示し、その構造について明らかにした上で、電波抑制特性を持ちつつエネルギーとして取り出す技術を確認することである。

3. 研究の方法

3.1. 提案構造

提案する構造を図 2 および図 3 に示す。円形金属パターンを採用した基本的な FSS 型電磁波吸収体に対し、導体層に方形スロットを周期配列した構造であり、円形パッチ層、誘電体層、スロット層で構成される。この時、円形パッチの半径を r 、スロットの長さを l_s 、幅を w_s とし、スロットの中心は、パッチの中心から y 軸に s_s だけシフトさせ、円形パッチ、スロットともに周期 w にて周期配列する。円形パッチの FSS 型電波吸収体は、円形マイクロストリップアンテナと同様に形状および寸法が決定可能である (須賀良介他、信学論 C、2018)。この時 r と整合周波数 f_0 の関係は式(1)および式(2)で示される。

$$f_0 = \frac{1.841c}{2\pi r_{eff}\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

$$r_{eff} = r \sqrt{1 + \frac{2h}{\pi r \epsilon_r} \left(\ln \left(\frac{\pi r}{2h} \right) + 1.7726 \right)} \quad (2)$$

ここで、 c は光速、 ϵ_r は誘電体の比誘電率、 r_{eff} は円形パッチの実効半径、 h は基板厚さである。誘電体材料および整合周波数を決定した後、式(1)および(2)によって r の初期値を決定する。スロット幅 w_s は f_0 における自由空間波長 λ_0 よりも十分小さい 1 mm とし、スロット長 l_s は $\lambda_0/2\sqrt{\epsilon_r}$ とした (山本学、信学論 B、2014)。以上より提案構造の初期値を決定し、

電磁界解析により各パラメータと特性の関係を把握し形状決定を行った。解析ソフトは CST 社製の MW studio を使い、単位モデルの境界条件を電気壁・磁気壁とすることで平面方向に無限周期とみなした。

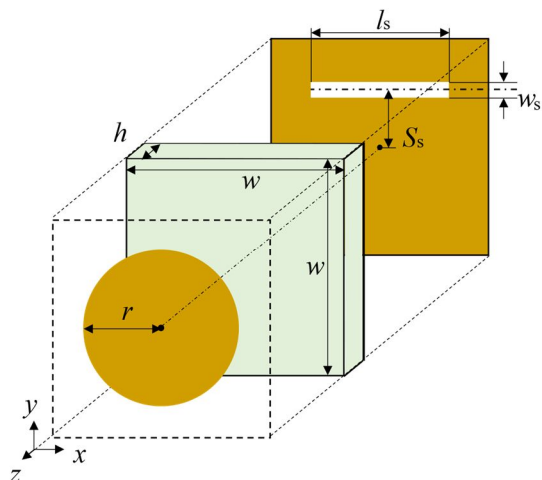


図 2 提案構造の単位モデル

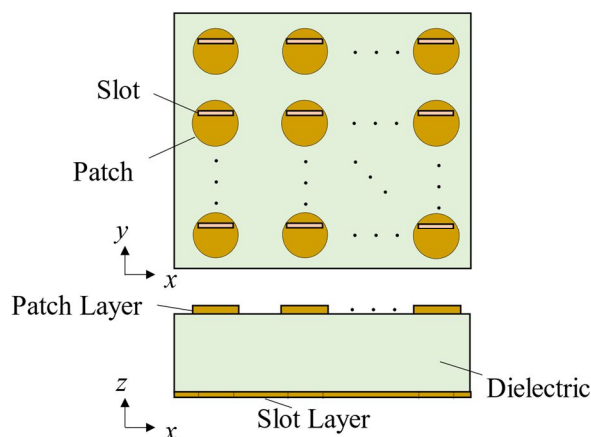


図 3 提案構造の周期配置モデル

4. 研究成果

4.1. 電磁界解析による形状最適化

解析では、図 2 の z 軸正側の端面を port1、負側の端面を port2 とし、port1 から平面波 ($E_x = 0, H_y = 0$) を照射したときの反射量 S_{11} および透過量 S_{21} を計算した。 S_{11} は電波吸収特性、 S_{21} は給電線路を設けることでアンテナとしてエネルギーを取り出せる指標としての特性と考慮した。誘電体は市販のガラスエポキシ樹脂 (FR-4 基板) を想定し $\epsilon_r = 4.5$ 、 $h = 0.8$ mm、誘電正接 0.015 とした。無線通信や無線電力伝送で用いられる周波数である $f_0 = 5.7$ GHz をターゲットとし、 $l_s = 11.8$ mm、 $r = 7.1$ mm (初期値) を算出、 $w = 30$ mm (初期値) とした。各パラメータ S_s 、 r 、 w を変化させたときの解析結果を図 4~図 6 に示す。

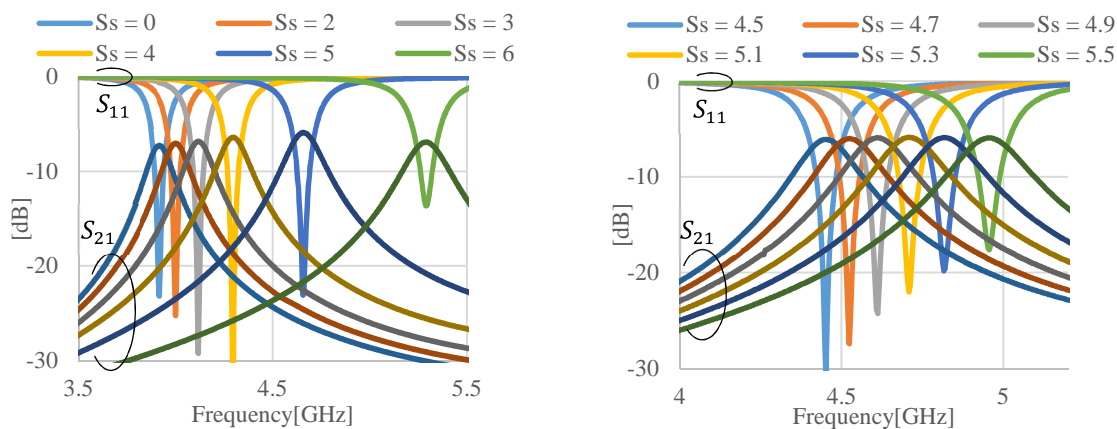


図 4 S_s を変化した時の特性

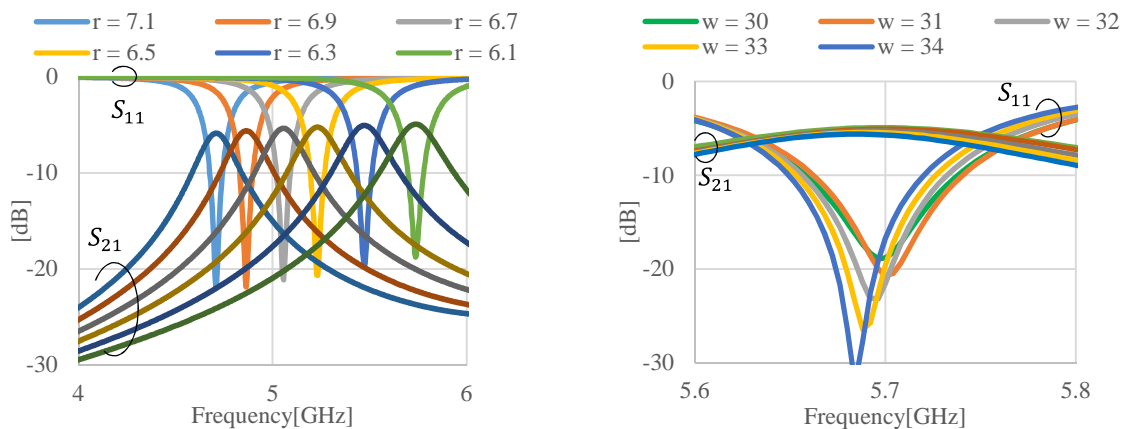


図 5 r を変化した時の特性

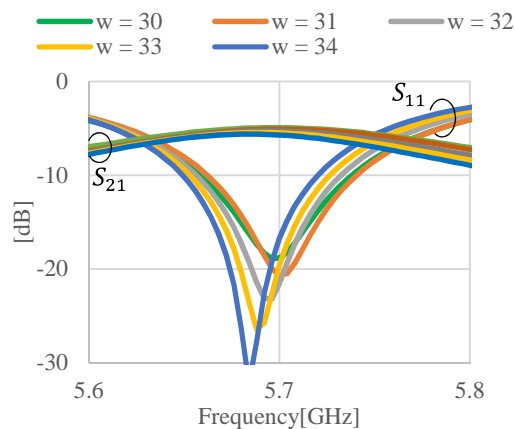


図 6 w を変化した時の特性

図 4 よりパッチ位置に対するスロットの位置によって、周波数特性、反射量および透過量に影響を与えることが判明した。スロットがない場合は 5.7GHz に吸収特性を持つことに対し、図 7 に示す通りスロットがあることにより共振時の地板上の電流経路が長くなり共振波長が長くなったことで特性が低周波へシフトしたと考えられる。本検討では S_{21} が最も高くなる条件を解析により算出し、 $S_s = 5.1$ mm と決定した。スロットの影響により変化した周波数特性および S_{11} は図 5 および図 6 に示す通り r 、 w によって制御することができる。これは円形パッチを配列した FSS 型電磁波吸収体と同傾向であり、提案形状ではほぼ S_{21} に影響なく特性を最適化できることを確認した。また、入射角 θ に対しても w によって同様の制御が可能であり、本検討では垂直入射だけでなく斜入射にも特性を示すよう $\theta = 30^\circ$ にて最適化を行った。電磁界解析にて決定した形状を表 1 に示す。

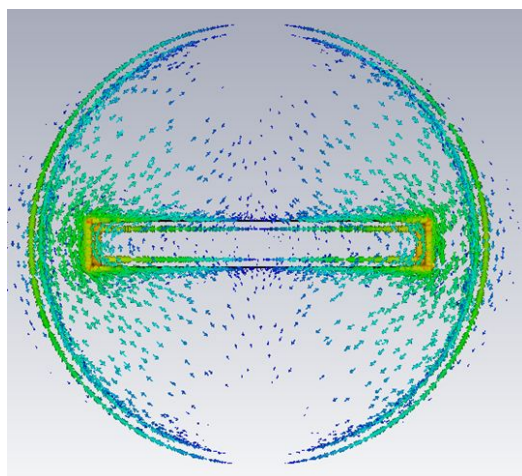


図 7 $S_s = 0$ の時の解析モデルの面電流分布

表 1 試作品の形状

パラメータ	h	r	w	w_s	l_s	S_s
数値[mm]	0.8	6.125	33	1.0	11.8	5.1

4.2. 試作評価

表 1 の通りの形状にて試作を行ったものを図 8 に示す。200×200 mm の基板の上に 6×6 コニットの周期配列をさせ、電波吸収体として反射量の測定を行った。また、アンテナとしての特性を測るため、誘電体厚み 0.8 mm、大きさ 40 × 40 mm の FR-4 基板に幅 1.45 mm のマイクロストリップラインおよび SMA コネクタを実装したものを中央付近の 1 スロット直下に固定した。このとき、円形パッチとマイクロストリップラインの接続は電磁界結合給電方式とし、SMA コネクタの中心導体はマイクロストリップラインを介しスロット層と接続される。スロットアンテナの中央に給電点を設けた場合の入力インピーダンスは電磁界解析により算出し、スロットアンテナ給電点のインピーダンスを任意に下げたためオフセット給電法を用いた。試作品では給電インピーダンスと線路インピーダンスが 50 となるよう設計を行い、スロット中央に対し、マイクロストリップラインが x 軸に 5.1 mm シフトするよう配置した。このように給電ポートを設けることでアンテナとして指向性利得（放射パターン）の評価を行った。

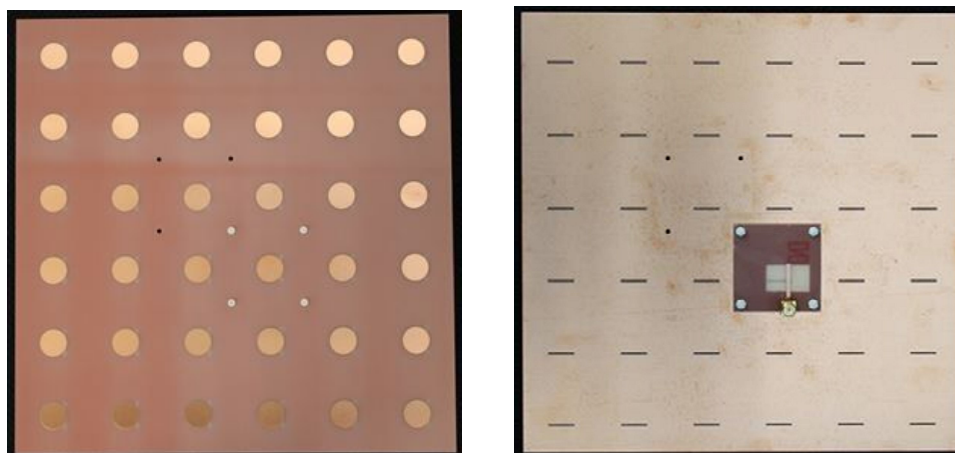


図 8 試作品の表面及び裏面

反射量の測定には、ネットワークアナライザを用いた。アンテナから照射された電波が非測定物に到達する際にフラウンホーファー領域を満たすよう、2つのホーンアンテナ（BHA9120-LF、3117）と被測定物をそれぞれ3m離し、斜入射特性の測定では被測定物の向きとアンテナの位置が適切となるよう配置した。被測定物の反射量と同寸法の金属板の反射量を比較し、その比率で反射量の評価を行う。その時、時間領域でのゲーティング処理によって、被測定物以外からの反射波の影響を取り除くよう処理を行った。放射パターンの測定は標準アンテナ法により行った。測定距離を3mとし、送信系に信号発生器、標準アンテナまたは試作品を、受信系に任意のアンテナおよびスペクトラムアナライザを接続し、それぞれのアンテナは床から高さ1.5mに配置した。測定は5面電波暗室にて行い、送受信アンテナ間の床面に電波吸収体を配置した。

試作品の反射量の角度特性を図9、アンテナ放射パターンの結果を図10に示す。比較のため解析結果を併せて示す。これらの結果より、提案構造は電波抑制特性を有しながらアンテナとしても機能することを確認した。反射特性の周波数特性は解析と実験とで約100MHz差があり、入射角特性の特徴は概ね一致している。解析上で考慮した誘電体の材料定数は同型式のFR-4を測定した値としており、ロット違いによる個体値のばらつき誤差が一つの要因としてあげられる。放射パターンの測定結果は、解析と実験で概ね一致している。ただし角度0°での放射利得は解析値で6.7dBi、実験値で4.8dBiであった。実験結果の指向性利得が低い理由は、反射量の差異が生じた要因に加え、マイクロストリップラインの加工精度が一つの要因と考えられる。試作品はエッジング加工によるものに対し、マイクロストリップラインは基板加工機により切削加工を行っており、実験にてマイクロストリップラインの個体差により利得が最大2.8dB (sample N = 4) 下がることを確認している。

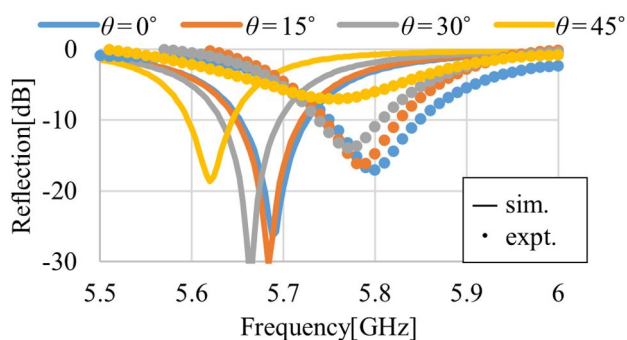


図9 反射量の角度特性

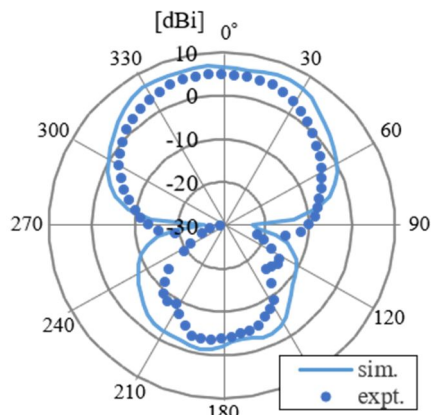


図10 放射パターン

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Obata Teru, Takahashi Fumio, Watanabe Yuta	4. 巻 12
2. 論文標題 Study on microwave absorber acting as an antenna	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 345 ~ 349
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2023XBL0015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小畑輝
2. 発表標題 受電可能な平面電波吸収体の研究
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 電波吸収体およびアンテナ	発明者 小畑輝	権利者 東京都立産業技術研究センター
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-172433	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------