

博士学位論文審査要旨

2018年2月13日

論文題目： Frequency Selective Surface を利用した電磁波吸収体の設計と応用に関する研究

学位申請者： 吉田 隆彦

審査委員：

主 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 吉門 進三

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻 幹男

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 馬場 吉弘

要 旨：

薄型で高い電磁波吸収性能を有する導体パターン装荷型電磁波吸収体 (パターン吸収体)は従来から研究されているが、その電磁波吸収メカニズムは未だ明確には解明されておらず、明確な設計指針の確立がもとめられている。本研究では吸収メカニズムの解明に新たな提言を行うことと、これまで例が少ない電磁波吸収体を実際の無線通信現場で用いて、その効果を実証することを目的とした。本論文は8章から構成されている。

第1章の序論では、Frequency Selective Surfaceをパターン層とするパターン吸収体の研究を俯瞰し、研究課題と研究目的を述べた。

第2章では、実験方法および無線通信試験を行うRFIDシステムについて述べた。

第3章では、パターン吸収体の設計因子の多様性と、研究当初提案した定性的な電磁波吸収機構を述べた。

第4章では、第3章で示した電磁波吸収が電磁波の波動性による空間干渉に因るという考え方は、エネルギー的な観点から物理的な妥当性が乏しいことから、パターン吸収体における電磁波吸収機構を明確化するために、これまで電磁波吸収体の解析に適用された例がない複素ポインティングベクトルの実部と虚部を用いた評価方法を提案し、パターン吸収体の内部および外部の各位置での電力の大きさと各方向への流れをポインティングベクトルにより定量的に示すことにより、パターン吸収体に関する設計指針の確立におけるポインティングベクトルの有効性を確認した。

第5章では、パターン吸収体の吸収中心周波数は、そのサイズをスケールリングし、それに応じて複素比誘電率の虚部を変えることにより、吸収中心周波数を変動させることなく高周波側に移行できることを示した。

第6章では、薄型・軽量のパターン電磁波吸収体を無線通信空間をゾーニングして使用することにより、RFID無線通信品質を大幅に改善できることを明らかにした。

第7章では、熱伝導性フィラーとして球状の磁性金属粉を用いた複合ゴムシート電磁波吸収材料の接触熱抵抗を直接測定する方法を提案した。

第8章では本研究を総括している。

以上述べてきたように、本論文は、様々な周波数に対応する薄型・軽量の電磁波吸収体の設計法の確立に関する先駆かつ実用的な研究であり、学術的にも工学的にも高く評価される。これらの成果はこの分野の発展に多大なる貢献をなすものである。よって、本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2018年2月13日

論文題目： **Frequency Selective Surface** を利用した電磁波吸収体の設計と応用に関する研究

学位申請者： 吉田 隆彦

審査委員：

主 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 吉門 進三

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻 幹男

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 馬場 吉弘

要 旨：

本論文提出者は、企業で積んだ経験をもとに、社会人特別選抜入試により2015年4月に理工学研究科博士課程（後期課程）に入学し現在在籍中である。本論文の主たる内容は、**Progress in Electromagnetics Research B**、電気学会論文誌A、**Proceedings of 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)**、**Proceedings of 2017 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)**で十分な評価を受けている。

2018年1月20日、午後2時より約2時間にわたり提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。

提出者は、語学試験に合格し、2回の英語による論文発表も行っており、十分な語学能力を有すると認められる。よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目：Frequency Selective Surfaceを利用した電磁波吸収体の設計と応用に関する研究

氏名：吉田 隆彦

要旨：

薄型ながら高い電磁波吸収特性を有する導体パターン装荷型電磁波吸収体(以下、パターン吸収体とする)の設計・開発・評価・応用に取り組んだ。パターン吸収体は従来から研究されているが、その電磁波吸収メカニズムは未だ明確には解明されていない状況である。本研究では吸収メカニズムに新たな提言を行うことと、これまで例が少ない電磁波吸収体を実際の無線通信現場で用いて、その効果を実証することを目的とした。

第1章の序論では、電磁波吸収体とくにパターン吸収体の研究を俯瞰し、研究課題と目的を述べている。

第2章では、実験原理、解析・評価方法、そして無線通信試験を行うRFIDシステムについて解説した。

第3章では、パターン吸収体の設計因子の多様性と、研究当初提案した電磁波吸収メカニズムを述べた。FSSパターン層を表層(電磁波入射面)に、そしてポリマー層および後面反射板を積層した構成を基本構造とするパターン吸収体に特定周波数の電磁波が入射すると、共振パターンと反射板から成る平行導体板、パターン導体内部にできる電気壁($E=0$ 面)、パターンエッジ(パターン端部)下部に形成される不完全な磁気壁が並列共振器単位となる。共振を担う各要素の因子がそのまま電磁波吸収体の設計因子となるため、一般的な単層型電磁波吸収体が吸収周波数に対応した材料定数、製品厚みなど互いに関連し合う限られた設計因子しか持たなかったのに対して影響度の異なる多くの設計因子を有し、選択することも可能となり、結果として従来にない薄い電磁波吸収体を設計可能である。

パターン吸収体の定性的な電磁波吸収メカニズムとして、吸収体面に垂直に入射した電磁波(平面波)に対して、一つの反射波は共振パターン導体で生じる反射波(照射波に対して位相が π 分だけ変化したもの)であり、もう一つの反射波は一旦パターン吸収体に取り込まれて、パターン導体の内部中央付近の電気壁での反射にて位相が π 変わり、その後共振器の端部にある磁気壁に再び達した場合の往復の経路長が位相 π となり、合計の位相変化が約 2π となって自由空間に再放射される反射波であるとして、これらの二つの反射波間の位相差が π の奇数倍となるため、互いに干渉して空間で減衰することにより、吸収が行われることを示した。

第4章では、第3章で示した電磁波吸収が電磁波の波動性による空間干渉に因るという考え方は、エネルギー的な観点から物理的な妥当性が乏しいことから、パターン吸収体における電磁波吸収メカニズムを明確化することが必要であると考えた。第3章で示した考え方で最も不明確な点は、導体面上に入射した電磁波のその後の流れが不明確であること、および電磁波吸収が入射波と反射波の干渉により電磁エネルギーが消失すると考えることが、エネルギー保存則を無視していることであった。とくにパターン導体に垂直入射した電磁波が直接反射した場合のエネルギーの消失を説明することが困難であった。そこで電磁波の電力の流れを表す時間平均ポインティングベクトル S を用いて、パターン吸収体の導体パターンから直接反射された電磁波の電力(以後電力)

の大きさと向きを求め、そしてそれらを基に吸収される電磁エネルギーの時間的な挙動変化を明らかにすることを試みた。

吸収体の異方性を考慮した複素ポインティングベクトルの実部と虚部を用いた評価方法を提案し、その妥当性を確認するため、それぞれ $0\ \Omega$ と $377\ \Omega$ とした均質面に電磁波(平面波)を照射した場合について解析・評価を行った。その結果、電力の実(real)の流れ、虚(imaginary)からの波動性による挙動が明確となった。続いてパターン吸収体の内部および外部の各位置での電力の大きさと各方向への流れをポインティングベクトルにて評価した。その結果、パターン吸収体のパターン導体に垂直入射した電磁波の実部の電力は、部分的に水平方向の流れに変換され、パターンエッジに向かうに従い大きくなり、パターンエッジでパターン導体の周囲を上下方向に半周するようにパターン吸収体の内部に入り、水平方向逆向きの大きな流れとなってパターン導体内部に形成される電気壁に向かう流れになることを明らかにした。またこの電力が水平方向の流れへの変換することから、パターン吸収体内での共振方向およびその距離を横方向(水平方向)とすることができ、結果として電磁波吸収体の上下方向(垂直方向)の厚みを薄くできることを明らかにした。

さらにポインティングベクトルの虚部からは、干渉などの電磁波の波動性に起因する現象を導出することができたが、この際、実部と同時に評価すれば、虚部で導かれる波の振幅強度からリターンロスなどを定量的に議論することが可能であることを確認した。非整合状態での空間に放出される反射波挙動や整合状態のパターン共振器内での強い横方向の干渉の結果として、そこで電力の貯蔵・蓄積する現象の存在が実部と共に虚部の結果から確認することができた。

第5章では、パターン吸収体の課題である吸収周波数帯域幅が狭くなることへの対策について述べている。電磁波吸収特性の解析値が、作製したパターン吸収体の実験値と良好に一致することが見出されているため、試作評価を主に評価した結果、まず理論値の場合よりも実測値の方が常に広帯域周波数特性を示していたが、さらにポリマー層に磁性材料が使用したときに広帯域周波数特性が得られていた。さらに設計因子が多く、それらの自由度も高いことからパターン吸収体の吸収中心周波数は、各設計因子をスケールリングすることにより大幅に高周波数側(例えば、ミリ波帯)に移行できることを見出した。ここで複素比誘電率の虚部 ϵ'' を変えることにより、吸収中心周波数を変動させることなく規格化入力インピーダンス z_0 のみを変えることができ、変更後の周波数帯にても $-20\ \text{dB}$ 以下のリターンロスを得ることが可能となった。これらの吸収周波数調整が容易にできることも、パターン吸収体の重要な特徴であることを示した。

第6章では、前述の高周波数側とは逆に、RFIDなどの電波方式のアンテナ通信としては低い $1\ \text{GHz}$ 以下の周波数帯に吸収周波数を調整した薄型・軽量の電磁波吸収体の開発について述べている。薄く、ハンドリング性に優れるパターン吸収体を、RFID無線通信空間に対応・適用させるために縦型パネルに加工して用いたRFID通信試験により、リーダアンテナからの照射波と金属板からの反射波の干渉により空間に生じる定在波を抑制できることを確認した。効果として、パターン吸収体で囲まれた空間の電磁波環境を自由空間に近似させることが可能となるため、信号通信が安定化してRFIDタグ読取率が向上した。RFIDの実際の現場では多くの金属体などの電磁波反射体が存在することになり、無線通信環境としては劣悪となる。この様な環境に対してもパターン吸収パネルを用いることで、必要な無線通信空間をゾーニングすることにより、RFID無線通信品質を大幅に改善できることを明らかにした。

パターン吸収体は、特定周波数のみであるが電磁波を反射せずに吸収する、しかも後面反射板を有しているために全体としては電磁遮蔽体として機能する。この電磁波を反射しないという性質において通常の金属遮蔽板とは異なる。すなわち、電磁波を漏洩しないというセキュリティ機能を有しながら、囲繞された内部空間に特定周波数の電磁波に対しては自由空間に類似した環境

を提供することが可能となる。この定在波を抑制する機能がRFIDの電磁波環境を改善するために有効に働いている。さらに今後、ミリ波帯電磁波を用いた自動運転技術や安全運転支援システム等が実用化される段階で、例えばトンネル内などの定在波が発生するような劣悪な電磁波環境において通信不良の問題の顕出が懸念されるが、そのような問題発生箇所に無線通信環境改善ツールとして、上述の電磁波吸収体が適用されることが期待される。

第7章では、相反する熱伝導性と柔軟性の両機能を満たすための単層型電磁波吸収体(複合ゴムシート)の評価方法について述べている。これらの要求仕様を総合的に評価するため定常熱流計法熱伝導率測定装置を応用し、熱伝導性フィルターとして球状の磁性金属粉を用いた複合ゴムシート電磁波吸収材料の接触熱抵抗を直接測定する方法を提案した。その結果、所望の電磁波吸収特性を示す複合ゴムシートにおいて、柔軟性および高熱伝導性のバランスを取りつつ磁性金属粉フィルターの充填量を最適化できることがわかった。

第8章では本研究を総括している。パターン吸収体の電磁波吸収の原理は次の通りとした。垂直入射波(平面波)がパターン吸収体に入射後、共振パターン導体の表面に沿って実の電力として水平方向に流れ、その電力の流れはパターン間隔において隣接するパターンから対向して流れくる電力の流れと、さらにその周囲に照射される垂直下向きの入射波の電力がすべて合流して、パターン間隔から入力する。その後、共振器構成のパターン吸収体内のパターン導体下部に干渉などで一時的に多量に蓄積される。電磁波吸収はエネルギー保存則に適合しない空間での干渉効果で消失するのではなく、パターン共振器構成内に貯められる電力(S_{y10} および S_{y10})量と材料による熱損失能力によりその能力を決められていた。

これまで電磁波吸収体にポインティングベクトルによる解析を適用された例はなく、さらにデバイス評価などに利用される場合は多くのほとんどが実部のみが用いられていた。今回は実部に合わせて虚部をも考慮して、電磁波の粒子性あるいは波動性の挙動の両方を評価できることになり、これらを組み合わせて電磁波吸収体の吸収メカニズムを提案した。本研究の例に限定されることはなく、ポインティングベクトルは複素数で表される電界、磁界の値があれば、たとえ近傍界や遠方界に関係なく計算できるため、今後、さらに電磁波の諸現象についての内容把握が可能となるであろう。