

博士学位論文審査要旨

2010年2月17日

論文題目: Design of Composite Electromagnetic Wave Absorber by Controlling Permeability and Permittivity (透磁率と誘電率制御による複合電磁波吸収体の設計)

学位申請者: 堺 健司

審査委員:

主査: 同志社大学大学院工学研究科 教授 吉門 進三

副査: 同志社大学大学院工学研究科 教授 大鉢 忠

副査: 兵庫県立大学大学院工学研究科 教授 畠山 賢一

要 旨:

電磁波吸収体は、電磁波を扱う環境で生じる様々な問題を解決する重要な役割を担っている。現在使用されている電磁波は主に数 GHz であるが、将来は数十 GHz となることが予想され、電磁波吸収体も高周波化、周波数の変遷に対応する必要がある。また、電磁波吸収体が大面積で使用される場合、低コスト化、高い量産性、さらに資源の枯渇問題や環境負荷の低減も考慮しなければならない。以上のことを考慮して、本論文では、先ずフェライトとシリカ (SiO_2) から成る複合電磁波吸収体、さらにアルミニウムあるいは軟磁性体微粒子と樹脂から成る複合電磁波吸収体の開発が行われ、報告されている。

1~3 章では序論と研究目的が示され、電磁波吸収体の設計における複素比透磁率 μ_r^* と複素比誘電率 ϵ_r^* の重要性が述べられ、その評価方法が記されている。

4 章および 5 章では、従来の電磁波吸収体の主流であった Ni-Zn フェライトと SiO_2 との複合体について、一方の粒子が他方の媒質中で孤立分散した場合、 μ_r^* の測定値が孤立分散する粒子の種類と分散状態に依存し、提案した理論計算の結果に近づくことが示されている。また、数 GHz でリターンロスが -20 dB 以下 (99% 以上の電磁波エネルギーが吸収されて熱に変換される) となり、フェライト吸収体よりも高周波で使用可能なことが明らかにされている。

6 章および 10 章では、アルミニウム粒子をポリスチレン樹脂に分散させた複合体の μ_r^* の実部が電磁波の入射で生じた磁気モーメントにより 1 以下となり、10 GHz 以上でも吸収条件を満足できることが示されている。さらに、 μ_r^* の解析的な計算式が提案され、計算結果はその実測値と概ね一致することが示されている。その結果、アルミニウムの粒径、混合量、粒度分布により μ_r^* が制御できることが明らかにされ、これをもとに、電磁波吸収体を容易に設計する方法が提案さ

れている。

7～9章では、希少金属を含まない磁性体であるセンダスト粒子をポリスチレン樹脂に分散させた複合体について、その混合量、粒径、粒子形状を変化させて評価が行なわれている。比較的少量のセンダスト粒子の混合量で、20 GHz 以上で良好な吸収特性が得られることが示され、高周波用の実用的な電磁波吸収体の作製が可能であることが明らかにされている。

11章では、センダストとアルミニウム粒子をともにポリスチレン樹脂に分散させた複合体について、各粒子の総混合量を一定とし、それぞれの混合比を変化させることで、 ϵ_r^* の増加が抑制され、 μ_r^* の周波数特性のみを変化させて、実用的な電磁波吸収体の吸収特性の制御が可能であることが明らかにされている。

12章は4～11章の結論が示されている。

以上より、本論文は将来的に様々な分野で使用周波数が高周波化する場合においても電磁波吸収体を容易に設計可能にし、かつ安価で量産性の高い製作方法を提案しており、学術的にも工学的にも高く評価される。

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

2010年2月17日

論文題目: Design of Composite Electromagnetic Wave Absorber by Controlling Permeability and Permittivity (透磁率と誘電率制御による複合電磁波吸収体の設計)

学位申請者: 堺 健司

審査委員:

主査: 同志社大学大学院工学研究科 教授 吉門 進三

副査: 同志社大学大学院工学研究科 教授 大鉢 忠

副査: 兵庫県立大学大学院工学研究科 教授 畠山 賢一

要 旨:

本論文の提出者は2007年4月より本学大学院工学研究科博士課程後期課程に在学している。

各年度において優れた研究成果を挙げ、英語の語学試験に合格し、また国際会議で英語により7件の講演を行っており、十分な英語の語学力を有すると認める。またスペイン語についても十分な能力を有すると認定されている。本論文の主たる内容は、J. Euro. Ceram. Soc., PIERS Online, Key Engineering Materials, 電気学会論文誌等に掲載され、すでに十分な評価を得ている。また、Key Engineering Materials に投稿し、すでに受理されている。

本年1月16日午後3時30分より約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。以上により、本論文提出者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分であることが確認できた。

よって総合試験の結果は合格であると判定した。

博士学位論文要旨

論文題目： Design of Composite Electromagnetic Wave Absorber by Controlling Permeability and Permittivity (透磁率と誘電率制御による複合電磁波吸収体の設計)

氏名：塚 健司

要旨：

電磁波は、以前より無線通信分野で広く利用されてきたが、携帯電話などの様々な無線通信機器が近年急速に普及し、より身近なところで電磁波が利用されるようになってきた。さらに、今後は高度に発達した情報化社会の到来が予測されており、電磁波が使用される環境がより一層増加すると考えられている。このような電磁波が使用される環境では、電子機器からの不要な電磁波が他の機器に影響を与える問題、壁面などの反射波などと本来通信すべき電磁波が干渉し、通信ができなくなるなどの問題が生じている。さらに、電磁波が人体に影響を及ぼす可能性も指摘されており、電磁波による妨害の対策が必要とされている。電磁波吸収体は、入射した電磁波のエネルギーを熱エネルギーに変換するデバイスであり、このような電磁波による様々な問題を解決する重要な役割を担っている。

電磁波吸収体は、研究当初、軍事装備面からの要求や、電波暗室を構築するために用いることが主な使用目的であった。しかし、磁性体の磁気共鳴を利用したフェライト電磁波吸収体が日本で開発され、TVのゴースト対策などに広く用いられてきた。その後、電磁環境の変化とともに様々な電磁波吸収体が開発されている。

現在普及している無線LANやETCなどの無線通信システムでも、電磁波の干渉防止やセキュリティ対策として電磁波吸収体が求められている。これらのシステムでは、数GHz程度の電磁波を通信に使用しており、将来は、運輸、交通分野におけるITSの普及や高速通信を実現するミリ波通信などの実用化に伴い、数十GHzの電磁波が使用されることが確実となる。そのため電磁波吸収体も、このような高周波化、そして周波数の変遷に対応したものが必要となる。また、電磁波吸収体を使用される環境は、壁面や天井など大面積で使用される場合が多く、取り扱いが容易、低コスト、量産が可能などの条件も要求される。さらに、近年の資源の枯渇問題や環境問題意識の高まりから、当面枯渇の心配が無く大量に入手可能であること、無毒で環境負荷が極めて小さいことなどの付加価値も電磁波吸収体の開発で重要視されている。

しかし、このような要件を全て満たす電磁波吸収体は、まだ実現されていない。そこで、本研究では、低コストで希少元素を使用しない磁性体と非磁性体を選択し、これらの材料から構成される複合体を電磁波吸収体に応用することを目的として、磁性体の混合量、粒径、分散状態などを調節し、良好な吸収特性を実現できる電磁波吸収体について研究を行った。また、上記の要件を満たすため、人工材料のメタマテリアルを電磁波吸収体に応用することも報告されている。しかし、メタマテリアルは導体などの周期配列により実現されるため、電磁波吸収体においては、量産化などが難しく実用化には適さない。本研究では、このメタマテリアルの考えを基にして、非磁性体の導電性粒子と樹脂から構成される作製が容易な複

合体で、電磁波の入射により導電性粒子に生じた渦電流で磁気モーメントを発生させ、この磁気モーメントを電磁波の吸収に応用する複合電磁波吸収体についても研究を行い、新たな電磁波吸収体の設計法を示した。

本論文はこれらを詳述した 12 章によって構成されている。

第 1 章では、電磁波吸収体の歴史に触れ、これまでの研究概要と、現在、そして将来求められる電磁波吸収体をまとめ、本論文の研究目的を明示した。

第 2 章では、電磁波の吸収原理を述べ、そこから電磁波吸収体を設計する際に重要となる吸収体材料の複素比透磁率 μ_r^* と複素比誘電率 ϵ_r^* について詳述した。

第 3 章では、電磁波吸収体の評価方法について記した。

第 4 章では、Ni-Zn フェライトと SiO₂ から構成される複合体について、Ni-Zn フェライト粒子、SiO₂ 粒子をそれぞれ他方の媒質中で孤立分散させた複合体の評価を行った。また、それぞれの粒子が孤立した場合の μ_r^* の値を理論的に算出し、測定値との比較を行った。その結果、 μ_r^* の周波数特性は、孤立分散する粒子の種類に依存することがわかり、この結果は理論計算の結果と似たような傾向であった。また、これらの複合体は、数 GHz の周波数領域でリターンロスが -20 dB 以下 (99% 以上の電磁波エネルギーの吸収) となり、フェライト吸収体よりも高周波領域で使用可能なことが明らかになった。

第 5 章では、4 章で SiO₂ 粒子が孤立分散した場合に理論値と測定値が測定周波数範囲で一致しなかったことを受け、分散状態を実際の様子に近づけた場合の理論的な計算を行い、作製が難しい SiO₂ 粒子を 80 mol% 混合した試料を作製して理論値と測定値との比較を行った。SiO₂ 粒子の分散状態が変化すると、理論計算の周波数特性も大きく変化し、測定した μ_r^* の周波数特性に近づいた。そのため、SiO₂ 粒子を孤立分散させた場合、SiO₂ 粒子の配列状態も μ_r^* の周波数特性に影響を与えることがわかった。

第 6 章では、安価で量産可能な電磁波吸収体、そして人工媒質の実現などを念頭に置き、アルミニウム粒子をポリスチレン樹脂に分散させた複合体について評価を行った。 μ_r^* の実部 μ_r' は、高周波の電磁波が入射して生じた渦電流により磁気モーメントが発生し、1 よりも小さな値となった。これは、高周波領域で求められる吸収条件を満たす重要な要素であり、高周波領域に対応した電磁波吸収体の実現が示唆された。また、帯域幅は狭いものの、厚さ数 mm、数 GHz でリターンロスが -20 dB 以下となり、この複合体が電磁波吸収体として機能することが確認できた。さらに、アルミニウム粒子の粒径が渦電流の流れる表皮深さと比較して大きな場合、 μ_r^* の値は定性的な理論計算の結果と測定値が概ね一致し、アルミニウム粒子の混合量と粒径を調整することで μ_r^* の実部 μ_r' と虚部 μ_r'' を独立に制御できることが明らかになった。この結果より、吸収特性を人工的に制御できる可能性が示された。

第 7 章では、磁性体の磁気特性と、6 章で明らかにした導電性粒子分散複合体の磁気モーメントが μ_r^* へ及ぼす効果を共に組み合わせた新たな電磁波吸収体を実現するため、導電性の磁性体であるパーマロイもしくはセンダスト粒子をポリスチレン樹脂に分散させた複合体について評価を行った。これらの複合体は、磁性体の混合量が少ない場合、厚さ数 mm、数 GHz および 10 GHz 付近でリターンロスが -20 dB 以下となり、規格化した -20 dB 帯域幅も 10% を超えた。さらに、密度もフェライト吸収体などと比較すると小さく軽量化も達成でき、特に

希少金属を含まないセンダストを用いることで実用的な電磁波吸収体を作製できることを明らかにした。

第 8 章では、センダストを分散させた複合体について、センダストの粒径や粒子形状が吸収特性に与える影響について調査を行った。 μ_r^* 、 ε_r^* 、およびリターンロスの周波数特性はセンダスト粒子の粒径や粒子形状に依存することが明らかになり、粒子形状を粒状、粒径を小さくすることで吸収特性が良好になる傾向が確認された。

第 9 章では、センダスト複合体について、40 GHz までの吸収特性を評価するとともに、 μ_r^* について検討を行った。 μ_r^* について考察するため、導電性粒子のアルミニウムを分散させた複合体、導電率が大きく磁性も有するニッケルを分散させた複合体を作製し、センダスト複合体の μ_r^* と比較を行った。その結果、センダスト複合体の μ_r^* は、およそ 20 GHz 以下では磁気共鳴による周波数特性が支配的であるが、それより高い周波数では、渦電流による磁気モーメントが μ_r^* の周波数特性を決定するという結論に至った。そのため、高周波側では 6 章の結果より、センダストの混合量や粒径により μ_r^* をある程度制御し吸収特性を改善することが可能であることが示された。また、センダスト複合体は、20 GHz 以上で数%程度の規格化した -20 dB 帯域幅を実現でき、数十 GHz の周波数に対応した実用的な吸収体の作製に成功した。

第 10 章では、6 章で述べたアルミニウム粒子を分散させた複合体について、アルミニウム粒子の粒径と表皮深さが同程度になる際に μ_r^* の理論計算と測定値が一致なくなる現象を説明するため定性的理論に改良を加え、全周波数領域で理論計算が適用できるよう μ_r^* の理論式を求め、1 MHz~40 GHz の広い周波数範囲で測定値との比較を行った。アルミニウム粒子の粒径、体積混合率、粒度分布を変化させた場合の測定値は、理論計算の結果と測定周波数範囲でおおむね一致し、理論計算の結果を利用することにより低周波側から高周波側まで μ_r^* の値を予測できることがわかった。作製した試料は 10 GHz 以上でも良好な吸収特性を示し、さらに、この議論をもとに、粒径、体積混合率、粒度分布により μ_r^* の実部と虚部を独立に制御し、任意の周波数で電磁波吸収体を作製する新たな設計法を提案した。

第 11 章では、10 章までの結果を受けてセンダスト粒子とアルミニウム粒子をともに分散させた複合体の特性を評価し、より自由度の高い電磁波吸収体の設計法について考察を行った。センダスト粒子とアルミニウム粒子を共に分散させると、比較的広帯域で良好な吸収特性を得やすいセンダストの μ_r^* の周波数特性を、添加したアルミニウムの粒径や混合量により改善できることを明らかにした。さらに、センダスト粒子とアルミニウム粒子の総混合量を一定とし、それぞれの混合比を変化させることで、 ε_r^* の増加を抑制し、 μ_r^* の周波数特性のみを変化し得ることを明らかにし、実用的な電磁波吸収体の吸収特性をある程度の範囲で人工的に制御できることを示した。

第 12 章では、本論文で得られた結果の要点をまとめた。