

京都大学	博士 (工学)	氏名	玉山 泰宏
論文題目	No-Reflection Phenomena for Isotropic and Chiral Metamaterials (等方性および旋光性メタマテリアルに対する無反射現象)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、磁氣的メタマテリアルを用いた TE 波 (s 波) に対する無反射現象の実証と、一般的な旋光性媒質に対する無反射現象の理論を確立するものであり、5 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、本研究の背景となるメタマテリアルについて述べ、それを利用した負屈折媒質、回折限界を超える結像、座標変換光学などについて説明し、さらに本研究の目的と概要を述べている。</p> <p>第 2 章は、等方性および旋光性媒質における電磁波伝搬の基礎となる理論を述べている。波数と波動インピーダンスを媒質パラメータ (誘電率、透磁率、旋光性パラメータ) に対して表現した場合に現れる平方根は、複素関数として 2 価関数であり、適切な分枝を選ぶアルゴリズムが必要となる。特に電氣的、磁氣的応答に能動性がある媒質に対しては、従来の単純な分枝選択手法は適用できない。本研究では、マクスウェル方程式に遡って、電磁波のモード解析を厳密に行い、エネルギー伝搬方向と波数の向きに関係に着目することで、適切に分枝を選ぶ方法を明らかにした。</p> <p>第 3 章は、磁氣的メタマテリアルを用いた TE 波ブリュースター現象の観測について述べている。磁氣的媒質として分割リング共振器アレイを採用し、FDTD 法を用いて、その誘電率、透磁率を評価した。解析結果から、分割リング共振器の共振周波数付近において、TE 波に対するブリュースター条件を満たす媒質パラメータが存在することを示した。またマイクロ波に対する透過スペクトルを実験的に測定し、その妥当性を確かめている。そして、分割リング共振器アレイの TE 波に対する反射率の入射角依存性を測定し、特定の入射角に対して反射率が非常に小さくなる現象を観測した。これは、TE 波に対するブリュースター現象の明確な実証となっている。</p> <p>第 4 章は、電磁波が真空から旋光性媒質に入射する場合の無反射現象を扱っている。無反射条件は、反射ジョーンズ行列の零固有値条件に帰着されることを示し、反射ジョーンズ行列を単位行列とパウリ行列に分解することにより、無反射条件の物理的意味を明確にした。一般的な旋光性媒質に対しては、特定の入射角において、楕円偏光に対する無反射現象が生じることを示し、旋光性媒質に対する拡張ブリュースター現象の存在を明らかにした。さらに、媒質パラメータが特定の関係を満たす場合には、一方の円偏光に対して、入射角に依存しない無反射現象が実現可能であることを発見した。この場合、波動インピーダンスと波数の双方に対する整合条件が同時に満たされるために、反射のみではなく屈折も起こらず、当該媒質は一方の円偏光に対して真空と等価となる。この無反射無屈折現象が媒質の電場応答と磁場応答の打ち消しによってもたらされていることを明らかにした。また、カイラルニヒリティ媒質に対する無反射現象については、非旋光性媒質に対する無反射現象と同様に、特定の入射角において直線偏光に対して生じることを示した。特異な現象である、円偏光に対する無反射無屈折現象について、FDTD 法を用いて電磁波の反射屈折の様子を詳しく解析した。さらに、</p>			

氏名	玉山 泰宏
----	-------

検証実験のために必要とされる 3次元等方的旋光性メタマテリアルの設計、作成に関して詳しい検討を行っている。

第5章は結論であり、本論文の成果をまとめるとともに、将来の展望について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

メタマテリアルの出現によって、媒質の誘電率だけでなく透磁率をも自在に制御できるようになってきた。さらに旋光性、非相反性などを有する媒質の構成も可能になりつつあり、電磁波制御の新たな手段として注目されている。本論文の目的は、磁氣的メタマテリアルを用いたTE波 (s波) に関するブリュースター現象の実験的検証と、その一般化としての旋光性媒質に対する無反射現象の理論を確立することである。主な内容は以下のとおりである。

(1) 等方性媒質および旋光性媒質における波数と波動インピーダンスの数学的表現に関して考察を行っている。損失や利得のある場合、媒質定数は複素数となるため、平方根関数の2価性を考慮して、正しい分枝を選ぶ必要があるが、従来その扱いは不明確であった。本論文では、マクスウェル方程式から出発し、波数と波動エネルギー伝搬方向を関連づけることで、正しい分枝を選択する方法を見出した。この手法は負屈折率媒質のみならず、より一般的な電磁媒質に対する屈折率と波動インピーダンスの計算にも適用可能である。

(2) 従来、ブリュースター無反射現象はTM波 (p波) に対してのみ存在すると考えられてきた。これは既存の媒質が本質的に誘電体であり、磁氣的な応答を示さないことに起因する。しかし、メタマテリアルにおいてはこの前提は成り立たず、磁氣的な媒質が構成できれば、TE波に対するブリュースター現象が観測されるはずである。本論文ではメタマテリアルを利用して磁氣的媒質を人工的に構成し、TE波に対するブリュースター効果を実験的に確認している。磁氣的メタマテリアルは、分割リング共振器アレイの電磁気特性をFDTD法により計算した結果に基づいて設計された。

(3) 旋光性媒質を含む一般的な媒質に真空中から電磁波が入射する場合の無反射条件を理論的に求めている。無反射条件を反射ジョーンズ行列の零固有値問題として定式化することで、見通しのよい理論を展開している。一般的な旋光性媒質においては楕円偏光が特定の入射角に対して無反射となり、無旋光性媒質の場合の一般化になっていることを見出した。さらに、旋光性媒質における一方の円偏光に対する波数と波動インピーダンスのそれぞれが真空における値に等しい場合、対応する円偏光は任意の入射角に対して無反射となることを見出した。この条件を満たす媒質は一方の円偏光に関しては、全く応答せず、真空と等価であるという興味深い性質を示すことを明らかにした。

以上、本論文は、磁氣的メタマテリアルに対するTE波ブリュースター現象の実証を行い、さらに一般的な旋光性メタマテリアルにおける無反射現象を網羅的に調べ、円偏光に対する無反射無屈折現象などの興味深い現象を発見した。これらの成果は、メタマテリアルにおける電磁波伝搬理論の重要な基礎として位置づけられるものであり、今後、テラヘルツ、光領域における新たなデバイスへの応用が期待され、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成23年1月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。