

京都大学	博士 (工学)	氏名	浦出 芳郎
論文題目	Electromagnetic Properties of Checkerboard-like Metallic Structures at Terahertz Frequencies (チェッカーボード状金属構造のテラヘルツ帯における電磁的性質)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、電磁メタマテリアルの一種であるチェッカーボード状金属構造が有する対称性と、それに起因する特異な電磁的性質に着目し、テラヘルツ帯とよばれる周波数帯でそれらの実験的な検証、数値計算や理論による検討を行ったものであって、以下の7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、まず、本研究の背景である電磁メタマテリアル・メタ表面一般の研究状況について概説している。次に、本研究で着目するチェッカーボード状金属構造やテラヘルツ帯電磁波の特徴について説明している。本研究では特にチェッカーボード状金属構造の、(1)自己補対性に起因する周波数無依存応答と、(2)金属部の接続性に依存した特異な電磁応答に着眼することが述べられている。本章の最後では各章の概要がまとめられている。</p> <p>第2章は、本研究に関連する基礎的な事項をまとめている。まず、二次元周期的な薄い人工構造による平面波散乱問題の理論的な取り扱いを示し、透過係数といった用語の定義を与えている。次に、本研究で中心的な役割を果たすバビネの原理を導入し、平面波散乱の問題に適用している。加えて、本研究で試料の評価に用いる実験手法であるテラヘルツ時間領域分光法の原理や、実際の実験でテラヘルツ波発生・検出に用いる光伝導アンテナの動作原理について説明している。</p> <p>第3章は、チェッカーボード状金属構造が示す周波数無依存応答について述べている。理想的なチェッカーボード状金属構造は、金属部と空隙部を入れ替えても形状が不変であるという対称性、すなわち、自己補対性を有している。この自己補対性とバビネの原理を組み合わせることで、構造面に垂直に入射する電磁波の透過率が周波数無依存になることが述べられている。しかしながら、厳密に自己補対性をもつ理想的なチェッカーボード状金属構造は幾何学的に完全な点接触を含む必要があり、先行研究ではその物理的な実現は困難とされていたことが述べられている。本章では、その特異性を回避するために、点接触の部分を抵抗膜で置換するという手法を提案している。実際に、そのような抵抗膜を装荷した構造を微細加工技術により作製し、テラヘルツ時間領域分光法を用いて透過特性を評価した結果が示されている。置換した抵抗膜の面インピーダンスが理論的に予想される値の時に、振幅透過率が周波数無依存におよそ $1/2$ となったことが述べられている。加えて、有限要素法に基づく数値電磁界シミュレーションによって、共振構造がある場合などについて更なる考察を加えている。</p> <p>第4章は、チェッカーボード状金属構造に基づいたコヒーレント完全吸収体について述べている。コヒーレント完全吸収体とは、複数の入射波に起因する散乱波同士の破壊的干渉により、入射波のエネルギーを完全に吸収する系である。まず、理論モデルによってメタ表面のような薄い構造におけるコヒーレント完全吸収の必要条件を示し、第3章で提案した、抵抗膜を装荷した自己補対チェッカーボード状金属構造がこの必要条件を周波数無依存に満たすこと、とくに構造の回折周波数以下であれば、等強度・同位相の入射に対しコヒーレント完全吸収体として振る舞うことが理論的に考察されている。チェッカーボード状金属構造に基づくコヒーレント完全吸収体の特徴として、広帯域性と波長以下の微小な領域への電磁エネルギーの集中を両立できることが述べ</p>			

られている。また、有限要素法に基づく数値電磁界シミュレーションによるチェッカーボード状金属構造の吸収率の計算結果がこの理論的な予想を裏付けている。さらに、テラヘルツ時間領域分光法に基づいて、抵抗膜を装荷した自己補対チェッカーボード状金属構造の両側からパルス電磁波を入射する実験装置を構成したことが述べられている。パルスの到着タイミングを調整することで、干渉により、試料からの散乱波強度が減少することが示されている。平均的な吸収率は最大でおよそ 98%と推定されている。また、測定結果と理論モデルとの比較が行われ、定量的にもよく一致することが述べられている。

第 5 章は、チェッカーボード状金属構造を利用した動的なメタ表面について述べている。チェッカーボード状金属構造は金属部の接続点の面インピーダンスの高低によってその電磁的性質が大きく変化する。本章ではこの特徴に着目し、その接続点の面インピーダンスを動的に変化させることで、動的に特性を切り替えられるメタ表面として利用することを提案している。まず、バビネの原理に基づいて、面インピーダンスの切り替えが、補対構造への変化に等価であることが理論的に示されている。次に、これを実験的に実証するために、金属・絶縁体相転移特性を示す物質である二酸化バナジウムを可変抵抗膜として、基板の誘電性の効果を補償したメタ表面を設計し、実際に作製したことが述べられている。作製した試料の温度を二酸化バナジウムの相転移温度以上にすることで、メタ表面のテラヘルツ波応答がキャパシティブなものからインダクティブなものに切り替わったことが示されている。透過パワーに関してはおよそ 14dB の変化、位相シフトに関しては強度を変えない周波数でおよそ 90 度の変化があったことが示されている。

第 6 章は、第 5 章からの発展として、チェッカーボード状構造が平面カイラリティをもつ場合について理論的・数值的に考察している。平面カイラリティをもつ構造に特徴的な電磁応答として、円偏光に対する全透過率が入射方向に依存するという非対称透過現象がある。ここでは、第 5 章のチェッカーボード状メタ表面に卍字を変形した形状の共振構造を埋め込んだメタ表面を提案し、その電磁応答をバビネの原理に基づいて理論的に解析している。構造に適切な対称性があれば、接続点の面インピーダンスを変化させることで非対称透過現象を特徴づけるパラメーターの符号が反転することが示されており、これは動的な平面カイラリティの切り替えと解釈できることが述べられている。また、具体的な構造の数値電磁界シミュレーションにおいて、理論で予想される通りの平面カイラリティの変化が確認されたことが示されている。さらに、メタ表面上の電流・電荷分布から、提案構造における非対称透過特性の起源が議論されている。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果を要約するとともに、今後の研究課題について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、電磁メタマテリアルの一種であるチェッカーボード状金属構造が示す特異な電磁的性質について、特にテラヘルツ帯という周波数帯に着目し、実験・数値シミュレーション・理論の三つの手法により論じたものである。本論文の成果は大きく以下の2つの観点から整理される：

1. 自己補対性に起因する周波数無依存応答

理想的なチェッカーボード状金属構造は自己補対性を有しており、それに起因した周波数無依存な応答が予想される。本論文では、自己補対性に必要であると考えられていた実現不可能な点接触の部分を抵抗膜で置換するという独自の発想に基づき、実際に試料を作製し、テラヘルツ帯でその特性を評価した。理論的に予想される特定の抵抗値において自己補対性に起因する周波数無依存な透過特性が生じることを観測した。また、こうした抵抗膜を装荷した自己補対チェッカーボード状金属構造の両側から同位相・等強度のテラヘルツ波を入射すると、回折周波数以下で、広帯域かつ入射エネルギーをサブ波長領域に集める作用をもったコヒーレント完全吸収体として振る舞うことを明らかにした。

2. 金属部の接続性に依存した特異な電磁応答の動的メタ表面への応用

チェッカーボード状金属構造は金属部の接点が電氣的に接続しているか、していないかによってその電磁応答が大きく変化する。本論文では、その特異な性質に着目して、抵抗値を動的にスイッチングできる物質を接点部に配置した動的に特性可変なメタ表面を提案した。実際に、二酸化バナジウムとチェッカーボード状構造を組み合わせ、テラヘルツ波応答の動的切り替えの原理実証に成功した。また、単純なチェッカーボード状構造の透過特性の切り替えに加えて、チェッカーボード状構造に平面カイラリティをもった構造を適切に埋め込むことで、構造がもつ平面カイラリティの切り替えが可能になることを理論的・数値的に示した。

以上のように、本論文は、チェッカーボード状金属構造がもつ自己補対性を従来の研究とは異なる観点から考察し、これまで不明瞭であった点を明らかにしている。また、チェッカーボード状金属構造の特異な電磁応答を動的なメタ表面に応用することを提案し、実験的に実証している。本論文は、対称性に着目した物理の観点から興味深い知見に加え、人工構造によるテラヘルツ波制御という応用の観点からも重要な知見を含んでおり、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29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て、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。