

京都大学	博士 (工学)	氏名	中西 俊博
------	---------	----	-------

論文題目	Coupled-resonator-based metamaterials emulating quantum systems (量子系を模擬する結合共振型メタマテリアル)
------	---

(論文内容の要旨)

本論文は、原子系に代表される量子系を、電磁波伝搬を制御するメタマテリアルを用いて模擬することを主題としている。その中でも特に結合共振構造を基本とするメタマテリアルを中心に研究を行っている。シュレディンガー方程式という連続量子系の模擬に始まり、超光速光伝搬/超低速光伝搬現象の回路モデルの提案及び実現、メタマテリアル中への電磁波の保存、第2次高調波を高効率に生成するメタマテリアルなどの研究を行っており、全8章で構成される。

第1章は序論であり、メタマテリアルの概念や、典型的なメタマテリアルの構造や応用を紹介している。さらに、本論文の中心テーマである結合共振型のメタマテリアルの説明を行い、最後に、本論文の構成に関してまとめている。

第2章では、孤立量子系の古典回路モデルに関して述べている。相互作用する2準位系の古典回路モデルとして、結合LC共振回路を導入している。相反な素子であるインダクタによる結合と、非相反な素子であるジャイレータによる結合両方を用いることで、任意の2状態量子系の時間発展を回路で模擬することができる。この考え方を応用し、結合共振列で次元シュレディンガー方程式の時間発展を模擬する方法を提案している。トンネル効果といった通常のポテンシャル問題だけではなく、ベクトルポテンシャルが重要な役割を果たすアハラノフ・ボーム効果などの量子現象も模擬が可能で、その時間発展を回路シミュレータによる解析で示している。

第3章では、超光速光伝搬現象の回路モデルについて述べている。章の最初には分散媒質中での光の包絡線の伝搬方程式を計算しており、包絡線が分散関係の傾きで決まる群速度で伝搬することを示している。その中で、異常分散領域において光の群速度が光速を超えたり負になったりすることを示している。その後、より広い概念として群遅延を導入し、群遅延が負にもなり得ることを示している。そして、超光速群速度や負群速度に対応する負の群遅延現象を回路で実現する方法として演算増幅器を用いた回路を提案している。入力には十分帯域制限されたベースバンド信号を用いており、入力信号よりも出力信号が先に出力される負の群遅延を目で見える時間スケールで実現している。後半では、多段化による負群遅延の増大を実現する方法について考察している。

第4章では、光の低速伝搬現象と光の停止のアナロジーをベースバンド信号に対して動作する回路において実現する方法について述べている。低速伝搬を実現する高分散性媒質に対応する周波数特性を、オールパスフィルタを用いて実現している。オールパスフィルタは帯域制限されたベースバンド信号に対して群遅延をもたらすので、これらを多段接続することで低速伝搬が実現されている。実験では、40段縦続接続したオールパスフィルタに帯域制限されたガウスパルスを入力し、その波形を各オールパスフィルタの出力を測定することで、時空間上のパルスの運動を求めている。1段あたりの群遅延量は回路ごとにも、時間的にも制御できる構造になっている。空間的に群遅延を増加させると、スペクトル条件と呼ばれる条件を満たしている場合のみ、

京都大学	博士 (工学)	氏名	中西 俊博
<p>望み通り減速して伝搬するが、スペクトル条件を満たさないときには信号が伝わらない。一方、時間的に群遅延量を増加させた場合にはスペクトル条件は常に成立し、パルスを自在に減速したり、極端には停止させることすらできる。このスペクトル条件は、原子系を用いた光伝搬の実験と同一であり、回路モデルが忠実なアナロジーであることが示されている。</p> <p>第5章では、電磁場と相互作用する原子系とメタマテリアルの間に成立するアナロジーについて述べている。2 準位原子系と単一共振構造をもつメタマテリアルのアナロジーについて解説したのちに、3 準位原子系で見られる電磁誘起透明化(EIT)現象を模擬する結合共振型メタマテリアルのアナロジーについて述べている。また、シュレディンガー方程式から導かれる運動方程式とメタマテリアルの回路モデルから導かれる回路方程式が一致することが示されている。そして、両者の媒質としての電気感受率が同じ式になることから、原子系とメタマテリアル系が同一視できることが明らかにされている。</p> <p>第6章では、第5章で紹介している EIT 現象を模擬するメタマテリアルに関する研究として、その特性を外部制御する方法を紹介し、応用として電磁波の保存/再生を実証している。メタマテリアルに電圧制御可能な可変容量ダイオードを導入することで EIT 現象の制御を可能にしている。解析は回路モデルによる解析に加え、透過特性及び共振モードの解析を電磁界シミュレータで行っている。実験はマイクロ波領域で行っており、EIT 現象の動的な変調を利用して電磁波の保存/再生を実現している。また、前進波と後進波の解析から電磁波の位相情報をメタマテリアルが正確に保存できていることを示している。</p> <p>第7章では、メタマテリアルを用いた第2次高調波の高効率発生について述べている。これまでメタマテリアルを用いた高調波の増強では、基本波にのみ共振する単一共振メタマテリアルが利用されてきたが、高調波に対しても共振する2重共振メタマテリアルを用いることでより高効率な高調波発生が実現できることを示している。その例として磁氣的共振モードと電氣的共振モードが非線形容量の周波数混合効果で結合したメタマテリアルを提案し、マイクロ波領域での実験検証を行っている。実験では従来法と比べ約100倍の高調波発生効率を実現している。また、単一共振メタマテリアルや2重共振メタマテリアルと原子系との対応を式で示し、設計可能であるメタマテリアルの有用性を述べている。</p> <p>最後に、第8章では、本論文のまとめと将来への展望を述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、結合共振型メタマテリアルを用いて量子系を模擬することを主題としている。量子系の複雑な概念及び現象から本質のみを抽出してより単純で自由度の高い古典系において同様の現象を実現している。また、電磁波の保存や非線形光学効果の増強といったメタマテリアルの応用に関しても結合共振構造の特徴を利用して実現している。得られた主な成果をまとめると以下の通りである。

1. 孤立量子系の時間発展を正確に模擬する結合共振回路モデルを提案し、トンネル効果やアハラノフ・ボーム効果などの量子現象の模擬を回路シミュレーションで実現している。
2. 超光速光伝搬に対応する負群遅延を実現する回路を提案し、入力側より先に波形が出力側に現れる現象を実証している。
3. 光の低群速度化と停止に対応する現象を、オールパスフィルタを用いた回路モデルにおいて実現し、必要とされる条件も同一であることを示している。
4. 電磁波と相互作用する2準位系や3準位系におけるEIT現象のメタマテリアルアナロジーを厳密に提示している。
5. EIT現象を制御可能なメタマテリアルを考案し、電磁波の保存をメタマテリアル系で初めて実現している。
6. 2重共振メタマテリアルという新しい概念に基づき、第2次高調波の高効率生成に取り組み、従来の単一共振メタマテリアルの約100倍の効率を実現している。

本論文は、以上のように、主題である量子現象を古典系で実現することが基礎的な観点で重要であることに加えて、電磁波の媒質中への保存や非線形光学効果の増強といった応用を人工原子系といえるメタマテリアルで実現していることから、学術上、実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27年12月16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。