

< 研究紹介 >

研究項目 A01: 計画研究ウ

「構造共鳴を利用したマイクロ波の偏光及び伝搬制御」

研究代表者 北野正雄(京都大学)

研究分担者 出口博之(同志社大学)、酒井道(京都大学)、久門尚史(京都大学)、中西俊博(京都大学)

本研究班の目的は、無反射メタマテリアル、波動の異常群速度、プラズマメタマテリアルなどの独自性の高い研究を強力に発展させようというものである。メタマテリアルの基礎解析、設計手法を確立しつつ、メタマテリアルの検証実験に最も適した周波数帯であるマイクロ波領域において、新規現象の実証を行う。以下に主な研究テーマを5つ紹介する。

(a) 旋光性メタマテリアルを用いた円偏光に対する無反射現象

研究代表者らは、旋光性メタマテリアルにおいて、左、あるいは右円偏光の電磁波が任意の入射角に対して無反射・無屈折になる条件が存在することを理論的に明らかにした[1]。この条件を実現するためには、誘電率、透磁率、旋光性パラメータが精密に制御された媒質を作製する必要がある。特に、等方的な旋光性を実現するためには、空間の3軸独立に旋光性をもつ構造体を配置する必要がある。本研究では、図1のようならせん型の金属構造体を3次元的に配置したメタマテリアルを用いた等方的旋光媒質の実現を目標として、その設計及び作成を行う。その後、円偏波に対する無反射現象の実現と高効率円偏光ビームスプリッタへの応用も目指した研究を行う。

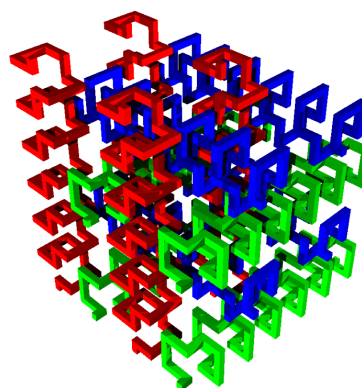


図1. 等方的旋光性メタマテリアル

(b) 電磁誘起透明化媒質の実現と電磁波の群速度制御

低群速度を得る手法として量子光学における電磁誘起透明化(EIT)が注目されている。このEITの技術は光を止めるという技術に発展し、光メモリ機能を実現するものとして期待されている。ここでは、EITと同様の現象を設計の自由度のより大きいメタマテリアルを用いて実現し、低群速度伝搬の実現、および群速度の動的制御を行う。EIT現象のメタマテリアルは低Q値の共振構造と高Q値の共振構造の結合によって実現される。本研究では、図2のような、低Q値共振器としてI型のカットワイヤ、高Q値共振器として2重リング共振器を構成要素とするEITメタマテリアルに関して研究を行っている。2重リング共振器には同相モードと

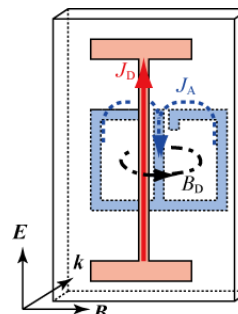


図2. EITメタマテリアル

逆相モードが存在するが、平面波と結合しにくい逆相モードを利用することで高いQ値と、電磁波の進行方向及び偏光によらない等方的EITメタマテリアルの実現が期待できる。また、この研究の発展形として入射電磁波の空間分布によって透明化領域の幅を制御できるメタマテリアルの研究も行っている[2]。EITメタマテリアルの応用として低群速度伝搬におけるパルス圧縮効果を利用した非線形現象の増強に関する研究も行う。

(c) 気体プラズマを導入した動的メタマテリアル

従来の固体で構成されたメタマテリアルに対して、気体中での放電現象に伴うプラズマを構成要素とするメタマテリアル（“プラズマ・メタマテリアル”と称する）は、動的かつチューナブルである。特に、マイクロ波からテラヘルツ波帯において、巨視的にはなく微視的に（材料特性としてそのままに）負の誘電率を実現する点、かつその誘電率は虚数成分も含んで複素数的に制御しうる点が独特である。同じく誘電率がローデ型で表される可視光領域の金属との関連で、光領域のメタマテリアルのマクロ実験モデルとしての役割も期待できる。さらに、対象となるマイクロ波が高出力となると、その現象は非線形性を強く帯び、メタマテリアルと他関連分野とを橋渡しする科学ツールとも言える。

・金属細線の二重らせん構造における動的メタマテリアル現象[3,4]

金属細線の二重らせん構造が、マイクロ波帯の磁気共鳴構造のみならず、kHz帯高電圧印加用のプラズマ生成電極としても動作する。線路を伝搬するマイクロ波に対して、数GHz程度で磁気共鳴現象が確認できる。さらに0.1~1気圧程度の気体封入により二重らせん構造の内外にプラズマが生成でき、プラズマ生成によって誘電率が負となるために、屈折率の実部は負の値の領域も含めて制御できる。

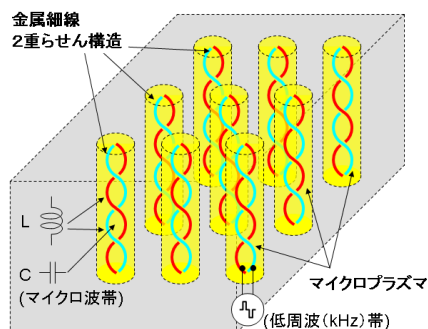


図3. 金属細線の2重らせん構造とプラズマによるメタマテリアル構造

・磁気共鳴構造におけるマイクロ波伝搬に伴う高密度プラズマ生成現象

磁気共鳴構造により負の透磁率状態が実現されるが、同時に伝搬マイクロ波が高電力の場合、共鳴構造体にエネルギーが蓄積される効果でプラズマ生成も生じる。つまり、伝搬マイクロ波により、プラズマ生成を通して空間の誘電率が変化し、その誘電率変化がマイクロ波の伝搬に影響する。すなわち、空間の透磁率と誘電率が同時に負となり、雪崩状にプラズマ生成現象と負の屈折率部が同時進行することが期待される。

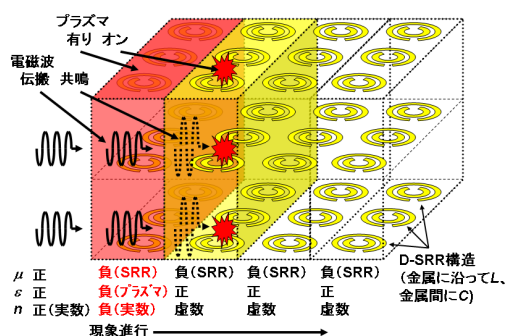


図4. 高電力マイクロ波によるプラズマ生成と負屈折率体の同時形成

(d) 遺伝アルゴリズム (GA) によるメタマテリアルの設計

・位相定数制御のための任意形

状線路素子の開発

平面回路線路の位相定数を制御する新しい線路形状を得るため、GAによる最適化を行っている。図5は提案する単位セル構造を示したもので、モーメント法による解析を基に評価関数を求めている。図6に設計目標とする位相定数と最適化で得られた素子の値を比較しており、

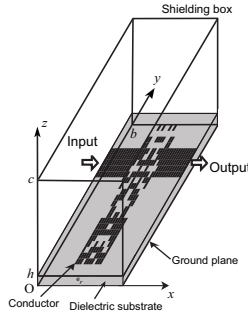


図5. 単位セル

同図中の素子を単位セルとして線路を構成すれば、位相定数を制御した平面回路線路を得ることができる[5]。

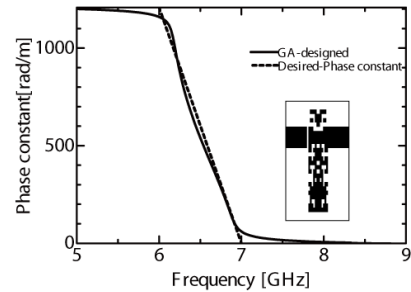


図6. 設計した素子の位相定数

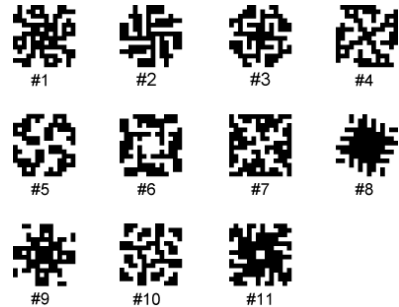


図7. 任意形状素子

・反射位相制御のための任意形状リフレクタレー素子の開発

リフレクタレーは、マイクロストリップ素子を2次元配列して構成され、反射位相量の正確な制御が課題である。図7はGAにより設計した任意形状素子(単位セル)を示したもので、30度間隔で反射位相を実現し、周波数依存性を全ての素子で揃えるように設計している。図8に無限周期境界条件を用いたスペクトル領域モーメント法によって求めた反射位相特性を示しており、良好な周波数特性が得られていることがわかる[6]。

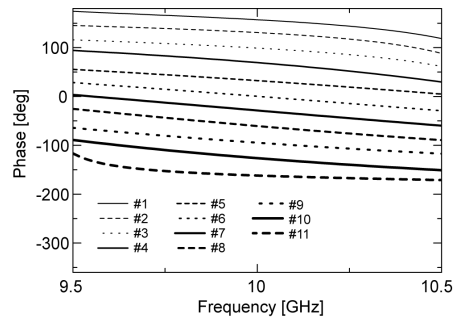


図8. 反射位相特性

・共振特性による直交偏波共用リフレクタレー素子の広帯域化

リフレクタレーの広帯域化を図るため、マイクロストリップ素子の複数の共振特性を利用した直交偏波共用素子を提案している。図9は提案する素子を無限周期配列したときの反射位相の周波数特性を1オクターブの範囲で示したもので、偏波依存性の小さい良好な直交偏波共用素子が得られている。これによりリフレクタレーを設計したところ、不要ローブを抑えた放射特性が得られている[7]。

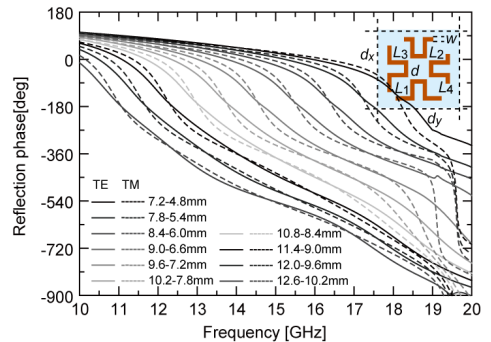


図9. 反射位相特性

(e) 単導体素子による回路モデルを用いた波動伝搬解析

電気回路は電気システムの設計や解析に有用であ

るだけでなく、種々の物理現象を記述するモデルとしても用いられる。代表的な回路モデルとしては、インダクタ・キャパシタ・抵抗などの素子から構成される集中定数回路、伝送線路を電信方程式で記述した分布定数線路がある

(図 10)。メタマテリアルの設計や解析にもこれらの回路がよく用いられるが、この研究では空間的に結合した導体系における電磁現象(Maxwell 方程式)の表現という視点から、新たな回路モデルを考えることにより、波動伝搬などの電磁現象の明確化を試みている。

分布定数線路は伝送線路をモデル化しているため、図 10 下のような信号線とグラウンド(帰路線)の均一な 2 本ペアの線で表現する場合が多い。しかし、一般の導体系では均一性は満たされず、

帰路線も明確でないため、このような分布定数線路で記述することが難しい。そこで、ペアを構成しない単導体線を基本素子とする回路を考える。無限長単導体上の電磁現象が波動方程式を満足することを利用し、有限長の単導体を進行波が伝搬する素

子を考え、端点の影響を考慮すれば、一般の導体系における電磁現象を記述できる。簡単な導体系の例として図 11 に屈曲単導体にステップ状電流を加えたときの伝搬現象の例を示す。屈曲部における反射や透過が見られるが、このモデルを用いるとそのメカニズムを説明できる[8]。

また、Maxwell 方程式を集中定数回路表現することにより単導体をモデル化することもできる。このような見方では、電気回路モデルのゲージ依存性や、電荷と電流を変数とした回路表現などが自然に導出される。モデルを構成しやすい構造の例として、導体球と導体線から成る構造(図 12)を考えることにより、メタマテリアルに用いられるような空間結合した導体系の回路モデルを構成し、そこに発生する電磁現象の明確化を考えている。

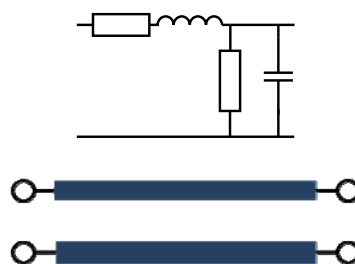


図 10. 集中定数回路と分布定数回路

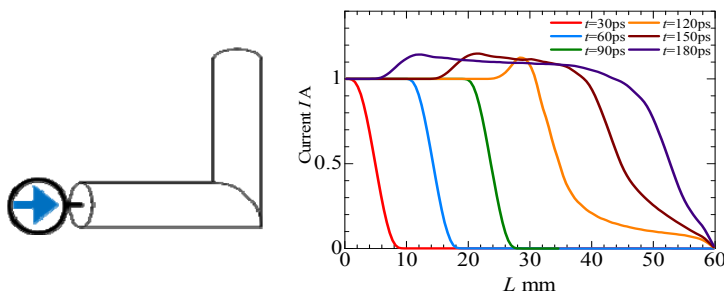


図 11. 屈曲単導体における伝搬現象

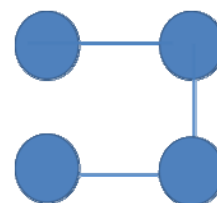


図 12. 導体球と導体線による構造の例

[1] Y. Tamayama, T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano, *Opt. Exp.* **16**, 20869 (2008).
 [2] Y. Tamayama, T. Nakanishi, Y. Wakasa, T. Kanazawa, K. Sugiyama, and M. Kitano, *Phys. Rev. B*, **82**, 165130 (2010).
 [3] O. Sakai, T. Naito, T. Shimomura, and K. Tachibana, *Thin Solid Films* **518**, 3444 (2010).
 [4] O. Sakai, T. Shimomura, and K. Tachibana, *Phys. Plasmas* **17**, 123504 (2010).
 [5] 井狩 苑子, 出口 博之, 辻 幹男, 信学技報, EMT-10-155 (2010-11).
 [6] 青木 祐樹, 出口 博之, 辻 幹男, 榎 修平, 信学技報, A・P2010-58 (2010-7).
 [7] 西村 昂洋, 出口 博之, 辻 幹男, 信学技報, EMT-11-38 (2011-1).
 [8] T. Sokooshi, T. Hisakado, U. Paoletti, O. Wada, *Proc. PIERS Moscow 2009*, 1562 (2009).