

＜研究紹介・自己紹介＞

研究項目 A01: 公募研究

「テラヘルツ波メタマテリアルにおける表面波の特異な分散特性と機能」

研究代表者 高原 淳一（大阪大学）

自己紹介

公募研究 A01 研究代表者の高原淳一です。私は 2010 年 10 月より同じ大阪大学の基礎工学研究科から工学研究科に異動し、現在はフォトンクス先端融合研究センター（略称：PARC、センター長 河田聡）の副センター長としてプラズモニクスを基盤技術とした文部科学省のイノベーション創出拠点プログラムを推進しています。専門はプラズモニクスおよび熱輻射制御とそのデバイス応用です。

私は 1986 年に大阪大学基礎工学部電気工学科に入学して以来、四半世紀ずっと阪大豊中キャンパスで暮らしてきましたが、今回吹田キャンパスにうつり新たな気持ちで研究室の立ち上げに取り組んでいます（現在、研究室の学生は 3 名です）。同じ大学内でも電気系と応物系とでは文化の違いを感じることもありますが、それもまた良い刺激となっています。

私はナノプラズモニクス、特にプラズモニック導波路の電磁界理論とそれを応用したナノ光集積回路の研究を行ってきました^[1]。これをメタマテリアルへと拡張することで、メタマテリアルにおける表面波の理論を確立し、当該領域の推進に基礎的な面で貢献したいと考えています。また、具体的なシミュレーションをテラヘルツ領域で行うことにより、テラヘルツデバイスへの応用をめざします。

研究紹介

メタマテリアルによる左手系媒質（Left-Handed Material: LHM）の実現によって、フォトンクスで利用可能な光学媒質の領域が大幅に拡張されました。しかし、多くの研究はバルク LHM 中の波動伝搬に興味集中しており、表面波（2次元光波）に関する研究はほとんどすすんでいません。表面波は進歩が著しいプラズモニクスにおいては表面プラズモン

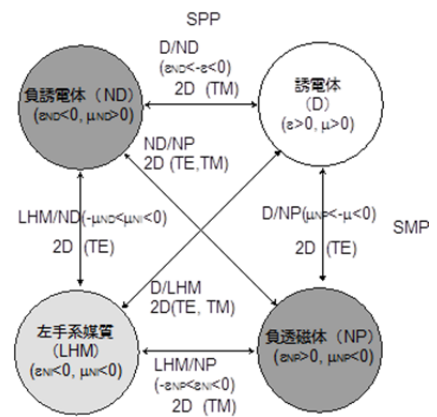


図1 6種類の光学ヘテロ界面

ポラリトン (Surface Plasmon Polariton: SPP) として中心的役割を果たしており、メタマテリアルにおける表面波の系統的な研究が必要です。

私の専門はプラズモニクスですが、これは負誘電体と誘電体の界面の電磁気学といえます。プラズモニクスでは負誘電体が中心的役割をするのですが、負誘電体の内部を光は伝搬できないので、Veselago ダイアグラムにおいて負誘電体中では光は非伝搬として、切り捨てられることも多いです。しかし、実はプラズモニクスで重要なのはバルクではなく界面なのです。誘電体・負誘電体界面すなわち第一と第二象限の境界を伝播する SPP (TM モード) としての表面波 (2次元光波) が主役であるといえます。自明のことですが、同様の表面波は第一と第四象限の境界 (誘電体・負透磁体界面) にも存在し、表面マグノン・ポラリトン (Surface Magmon Polariton: SMP) (TE モード) として知られています。

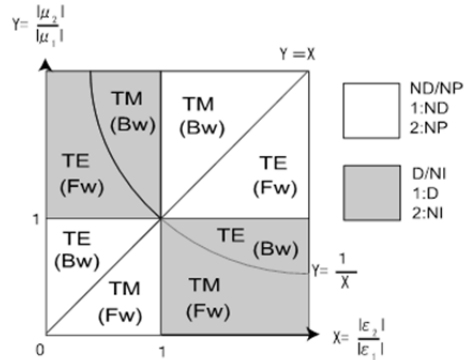


図2 D/LHM 界面の表面波の存在領域と偏光、FW/BW の分類: 白領域は ND/NP 界面、灰色領域は D/LHM 界面

私は 2004 年にこれを図 1 に示すような LHM を含む他の界面にも拡張し、光学ヘテロ界面と名前をつけました^[2,3]。正と負という光学的に全く異質の材料同志の界面なので「光学ヘテロ」としています。光学ヘテロ界面は図 1 に示すように 6 種類の組み合わせがあります。これらの界面は互いに ϵ 、 μ の符号が反対の性質を持つので、それぞれの界面に表面波が伝搬できます。そこでこれら 6 種類の光学ヘテロ界面のうち LHM を含む界面の表面波について、カイラル媒質も含めて系統的に物理的特性を解明したいと考えました。特に、LHM と誘電体との界面 (D/LHM 界面) においては TM と TE の両方の偏光が存在できるという特徴をもちます。これは SPP や SMP との本質的な違いといえます。後からわかったのですが、D/LHM 界面については、我々の提案とほぼ同時期に Shadrivov らにより存在条件が導かれています^[4]。図 2 にその結果を示します。D/LHM 界面は誘電率と透磁率を変化させると、偏光 (TM/TE) による分類と前進波 (Forward Wave : FW) と後退波 (Backward Wave : BW) による分類によって、存在領域が完全に分離することがわかっています。この図が示すことは、FW と BW の境界線上でポインティングベクトルの値が 0 (stopping light 状態) となり、光が停止するという事です。もしメタマテリアルにより LHM



を実現したとすると、誘電率と透磁率をわずかに変えることにより、光を停止させたり、FW と BW を切り替えたりすることができるはずですが。これはおもしろいデバイス原理になる可能性を秘めています。

本研究では光学ヘテロ界面の表面波の分散関係を理論的に解明し、そのデバイス応用を目指します。特に、実際にメタマテリアルによる LHM を作製することが可能なテラヘルツ波を具体的な周波数の目標とします。

参考文献

- [1] 高原淳一, ” プラズモニック導波路” 応用物理, 80(9) (2011) 772.
- [2] J.Takahara et al., *Optics & Photonics News* 10 (2004) 54.
- [3] J.Takahara, *Plasmonic Naniguides and Circuits*, Ch.2, ed. S. I. Bozhevolnyi (Pan Stanford Pub., 2009).
- [4] I.V.Shadrivov et al., *Phys.Rev. E* 69 (2004) 016617-9.



<研究紹介・自己紹介>

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播制御」

研究分担者 中西 俊博 (京都大学)

研究項目 A01 研究計画ウ「構造共鳴を利用したマイクロ波の偏光及び伝播制御」の分担研究者の中西俊博です。私の自己紹介並びに研究略歴と現在メタマテリアルに関して行っている研究について紹介させていただきます。

私は、学部生の4回生より、京都大学工学研究科電子工学専攻量子電磁分野に所属し、北野正雄先生の指導の下に研究を行ってきました。研究室は私の配属した当時は、メタマテリアルの研究は行っておらず、量子エレクトロニクスという分野で、光と物質の相互作用や量子力学の基礎的現象を研究していました。私も、学部から修士課程にかけて、原子のスピン制御に現れる量子 Zeno 効果について研究を行っていました。量子 Zeno 効果とは、量子状態を観測することによって生じるデコヒーレンスが量子状態の時間発展を止めるという現象を指します。一見、この現象は純粋に量子的な現象であって、古典系では現れないと思われます。しかし、結合共振回路のような古典系の結合共振器間のエネルギーのやり取りにおいても、量子 Zeno 効果のアナログが存在することを研究の中で知りました。このように、原子系で起こる現象を回路で表現することは、今思えばメタマテリアル研究の第一歩であったのだと思います。

その後は、光の量子性を研究する量子光学の研究として、光子対の生成とその2光子干渉の研究を中心に行ってきましたが、その傍ら、電磁波動伝播の群速度制御についても研究を行っていました。その一つが、当時物議を醸していた光速を越える群速度伝播現象を回路で実現するというものでした。回路は「おもちゃ」といってよいような非常に簡単なものですが、入力を入れる前に波形を保ったまま出力されるという直感に反する現象を引き起こします。この現象も、光領域で行われた複雑な物理現象のエッセンスだけを抽出して回路化するという点で、メタマテリアルの考え方につながっていると思います。逆に、光の群速度を減速する方法についても、回路アナログを提案し実験での実証も行いました。以上の、光の異常群速度伝播の回路モデルは、変調波をもたないベースバンド信号に対して動作しますが、言い方を換えれば直流を含むような非常に波長の長い電磁波に対する、メタマテリアルと言うこともできます。

以上のように、これまでは、本物の原子やその量子状態を対象に研究を行ってきました。それと同時に、量子系や波動伝播の回路シミュレーションについても研究を行ってきました。このような背景が、人工原子で波動伝播を制御するメタマテリアルの研究へとつながっていきました。次に、現在私が主に研究しているメタマテリアルの研究のうち主なもの2つを紹介します。

(a) 結合共振メタマテリアルを用いた群速度制御

群速度を制御する方法として原子系でよく知られているのが電磁誘起透明化現象 (Electromagnetically Induced Transparency, 以降 EIT 現象) です。EIT 現象とは、本来不透明な媒質に補助的な光 (コントロール光) を入射することで、媒質が透明になる現象を指します。この透明化は、非常に狭い周波数帯域で起こり、その透明化領域でパルスの伝搬速度である群速度が非常に小さくなります。この現象は、3準位と2つの光の量子的な干渉効果によって引き起こされるものですが、波動的な性質のみを利用しているため、同種の現象が電子回路という古典系でも実現できることが報告されていました。

最近この回路モデルをメタマテリアルで実現することにより、メタマテリアル中の電磁波の群速度を低減できることが注目されています。人工的な原子であるメタマテリアルを用いることで、任意の波長帯で群速度制御を実現することができます。このような、EIT 現象を模擬するメタマテリアル(EIT メタマテリアル)は、図1のような低 Q 値の共振構造と高 Q 値の共振構造の

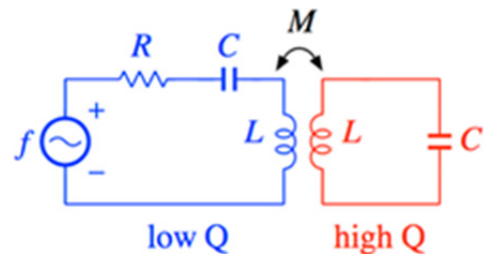


図1 EIT 現象の回路モデル

結合で実現することができます。EIT メタマテリアルにおいて、外部電磁場によって直接励振されるのは低 Q 値共振構造ですが、結合によって高 Q 値共振構造にエネルギーが移ることで、電磁場の吸収が非常に小さくなります。また、透明化帯域は結合の強さに比例して広くなり、結合の大きさを制御することで、電磁波の群速度を制御することが可能となります。現在、EIT メタマテリアルの群速度の動的制御と、非線形相互作用の増大について研究を行っています。

(b) 二重共振メタマテリアルを用いた第二次高調波の増大

共振型メタマテリアルにおいて、共振による電磁場の集中が起こることから、その場の集中した部分に非線形要素を導入することで非線形効果が増強されます。これまで、単一共振構造をもつメタマテリアルにおける第二次高調波の発生が研究されてきました。それに対して、基本波に共振する共振構造と第二次高調波に共振する共振構造をもつメタマテリアル（二重共振メタマテリアル）を用いることで、従来の単一共振構造しかもたないメタマテリアルより効率的に第二次高調波を発生できることに注目して研究を行っています。

二重共振メタマテリアルの最初の研究として、図2のようなメタマテリアルを研究をしました。図2(a)がユニットセル、(b)が一次側共振器、(c)が二次側共振器を示しています。一次側共振器にはI型のパターンに非線形容量をもつ素子としてショットキーダイオード(Rohm RB886G)が挿入されています。二次側共振器は少し短い金属ワイヤ構造で、一次側共振器の共振周波数の2倍の周波数で共振するように設計されています。この2つの共振構造が近くに配置されることで磁気的な結合が生じます。ここに、一次側共振器に共振する電磁波が入射したとき、ダイオードの非線形性と共振電流により、第二次高調波が発生します。発生した第二次高調波は磁気的な結合を通して、二次側共振器に移り、共振電流を流すことで、強い第二次高調波が外部へと放射されます。この実験によって、単一共振メタマテリアルの約5倍の第二次高調波発生を実現しました。現在、第二次高調波発生の効率をさらに向上する方法について研究を行っています。

以上の二つの研究は、いずれも結合共振器を基本とするメタマテリアルに関する研究です。これまでのメタマテリアルの研究は単一共振構造からなるものが多く、これは単一の機能を持つ「メタ原子」ということができます。ここに、複数の共振構造を結合させることで、「メタ原子」間に結合を導入することができ、人工的な分子「メタ分子」を作ることができます。さらに、共振

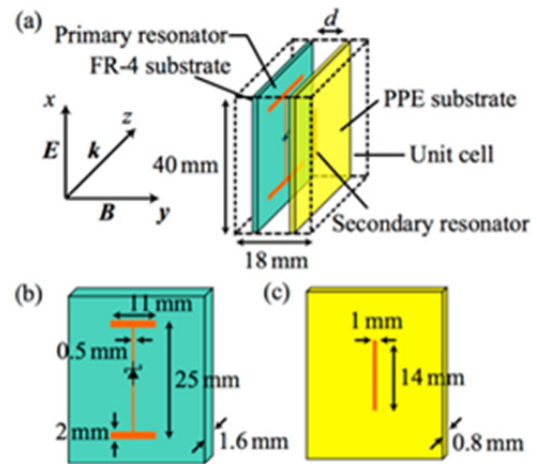


図2 (a) ユニットセル (b) 一次側共振器 (c) 二次側共振器の構造



器構造をネットワーク状に配置することで「メタ固体」も実現することができます。このような、「メタ分子」や「メタ固体」といった新たな概念を利用することで、より多様な特性を実現できると期待して研究を行っています。

＜研究紹介・自己紹介＞

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播制御」

研究分担者 出口 博之（同志社大学）

(d) 遺伝的アルゴリズム (GA) によるメタマテリアルの設計

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播制御」の研究分担者の出口博之です。

私は 1985 年に同志社大学工学部の超高周波工学研究室に学部 4 年生で配属され、滝山 敬先生、繁澤 宏先生、辻 幹男先生の指導のもとで、同大学院大学院博士課程（前期課程）まで、空洞共振器を用いたマイクロ波およびミリ波導波管フィルタの研究を行いました。電磁界解析には最小二乗法的モード整合法を用い、設計にはフィルタの理論に加えて非線形最適化手法を用いて通過域ならびに減衰極の制御を行うというものでした。その後、1988 年に三菱電機（株）に入社し、情報技術総合研究所アンテナ部に配属され、電波天文・通信・レーダなどに用いるアンテナの研究開発に携わりました。最初は、国立天文台野辺山の 45m 電波望遠鏡の電波ホログラフィを用いた鏡面精度測定法の研究や電波天文衛星「はるか」搭載用大型展開アンテナの電気性能評価法の開発を行いました。その後、国立天文台野辺山の 10m 電波望遠鏡のフレネル領域における電波ホログラフィ測定法の研究、ミリ波サブミリ波大型アンテナの新しい鏡面誤差評価法、2 ビームを可動させる 2 枚球面鏡アンテナの設計などを行いました。特に地上の電波天文用アンテナの研究では国立天文台の石黒 正人先生、大型展開アンテナの研究では宇宙科学研究所の三浦 公亮先生、高野 忠先生の指導もあり、順調に研究が進み学術的な成果にもつながっています。また、通信用アンテナの研究では、地上局などで用いられる複反射鏡アンテナの一次放射器として使用される複モードホーンアンテナやコルゲートホーンアンテナの設計・解析を行いました。これらの研究成果は、同社の喜連川 隆氏、片木 孝至先生、浦崎 修治先生、牧野 滋先生らが開発したアンテナ技術を基にさらに発展させて得られたもので、博士論文にまとめています。その他に、ビームモード展開法を用いた複反射鏡アンテナの設計・解析法、複反射鏡アンテナの交差偏波消去のための設計法、近傍界アンテナ測定法、アンテナレドームの設計・解析など、開口面アンテナの技術開発を中心に行いました。また、同研究所アレーア



ンテナチームにも所属して、レーダに用いられるアレーアンテナや通信に用いられる衛星搭載用マルチビームアンテナの研究も行いました。

そして、2000年に同志社大学に入社して以来、理工学部電子工学科に所属して教育・研究に携わり、超高周波工学研究室にて、アンテナの設計・解析や電磁波計測に関する研究などを行っています。現在、本研究室では、辻 幹男先生と私で、学部4年生と大学院生を合わせて約40名の学生に対して、超小型導波管フィルタ、デュアルバンドマイクロストリップ線路フィルタ、コプレーナ線路フィルタ、任意形状多層平面回路フィルタ、平面回路4端子素子、任意形状左手系素子（導波管および平面回路）、左手系媒質を用いた漏洩波アンテナ、UWBアンテナ、電磁波計測用ミリ波アンテナ、広帯域ホーンアンテナ、多モード角すいホーンアンテナ、誘電体装荷ホーンアンテナ、軸対称反射鏡アンテナ用小型一次放射器、周波数選択性多機能膜、リフレクトアレーアンテナ、平面レンズアンテナ、メタマテリアル媒質などに関する研究指導を行っています。

本課題の「遺伝的アルゴリズム (GA) によるメタマテリアルの設計」に関連する研究は、本学の大平 昌敬くんの修士論文、博士論文での周波数選択膜 (FSS) の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る解析や GA による広帯域 FSS (図1参照)、超小型導波管フィルタならびに UWB 用平面回路フィルタの最適化設計 (図2参照) が基礎になっています。

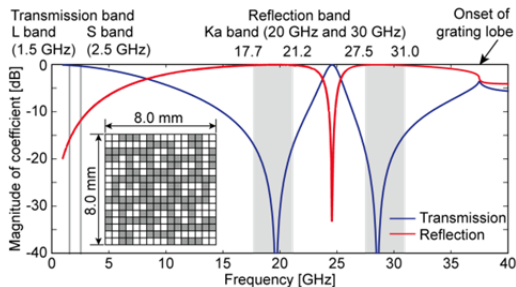


図1 GAにより設計したFSSの例

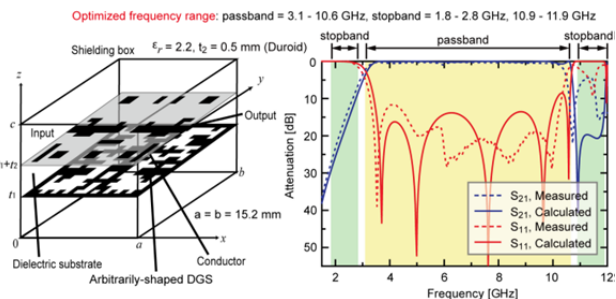


図2 GAにより設計したUWBフィルタの例

また、メタマテリアルの代表的な応用例の一つである漏洩波アンテナの分野においては、以前より、本研究室の繁澤 宏先生、辻 幹男先生が研究してきたことが電磁界解析・設計の技術的な基盤となっています。これは、漏洩導波路の厳密な電磁界解析を基にして、漏洩特性を巧みに制御することで高性能な周波数走査アンテナを得ようというものです。平面回路素子の漏洩特性についても詳細に研究され、右手/左手系複合線路漏洩波アンテナの設計 (図3参照) へと発展させています。

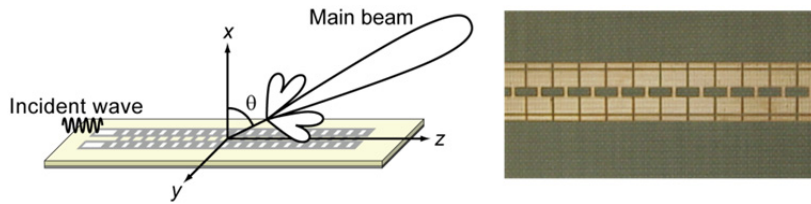


図3 右手/左手系複合線路漏洩波アンテナの設計例

これまで行ってきたリフレクタレーアンテナや平面レンズアンテナの設計・解析も、メタマテリアル・サーフェースやメタマテリア媒質の研究と密接な関連があり、本課題に取り組む一つのきっかけとなっています。このような放射素子の開発は実験的評価も非常に重要で、本学の電波暗室（幅 6 m，奥行 6 m，高さ 6 m）での通常の遠方界測定のほか、ミリ波平面走査型近傍界測定装置、プローブアレーによる 3 次元アンテナ測定システムによって詳細な評価を行い、研究を進めているところです。

現在、メタマテリアル線路素子として、平面回路線路の位相定数を制御する新しい素子形状を GA により検討しています（図 4 参照）。線路は周期構造からなり、その単位セルを任意形状の導体ストリップによって構成し、モーメント法による解析を基に評価関数を定義して設計しています。設計目標とする位相定数と最適化で得られた特性は比較的一致し、さらに広帯域化や低損失化のための検討を進めています。また、メタマテリアル・サーフェースとして、反射位相制御のための任意形状リフレクタレー素子の最適化を行っています（図 5 参照）。リフレクタレーは異なる形状の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に加えて、周波数依存性を全ての素子で揃えるよう GA により設計しています。

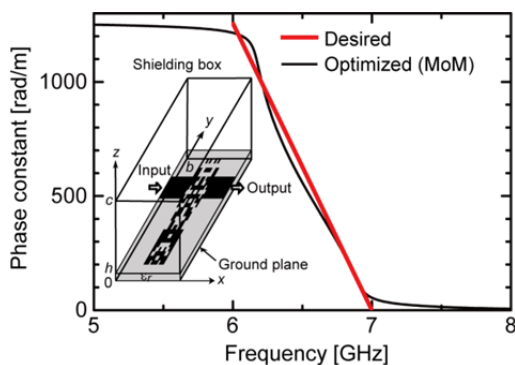


図4 任意形状線路素子の設計例

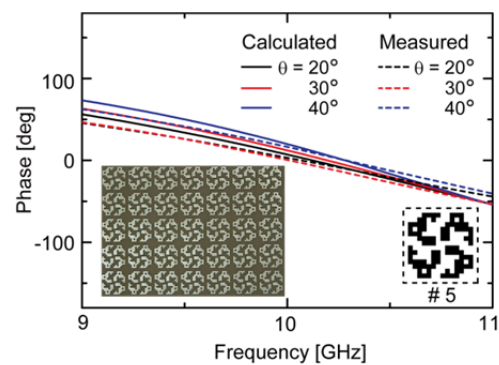


図5 任意形状リフレクタレー素子の設計例

さらに、このような構造で地導体板を取り除き、透過波の制御を行うものについても同様に検討しており、超薄型構造の平面レンズが期待できます。今後、漏洩波アンテナや多層構造メタマテリアル媒質に対しても GA による最適化設計を行う予定です。