

＜研究紹介・自己紹介＞

研究項目 A01: 計画研究イ

「構造共鳴を利用したテラヘルツ波メタマテリアルの作製と機能」

研究分担者 宮寄 博司 (東北大学)

計画研究イ分担者の宮寄です。計画研究代表者の萩行を中心としてテラヘルツ波でのメタマテリアルに関する研究を進めるとともに、遊軍的存在として各種メタマテリアル構造の理論解析の一部を担当します。簡単な自己紹介を交えながらメタマテリアルに関する研究の経緯を述べたいと思います。

萩行の誘いを受けてメタマテリアルの研究に着手したのは2007年頃と思います。それまではフォトニック結晶に関する研究を行っていました。千葉大におられた大高先生と協力して2次元周期配列誘電体のスミスパーセル放射の理論解析を担当したり、また、円柱を均一に分布させて自由な形状の光導波路を作れる UDPS という素材の提案などをしていました。萩行とは、若いころ研究会で会ったり、半導体表面のパルス放射によるテラヘルツ電磁波放射で計算を手伝ったこともあり、また、上記2次元周期配列誘電体に関する研究もあって、半ばニヤミス状態でしたが、2007年頃に Penrose 格子状に配列された金属開口からの異常透過に関する計算を頼まれたのが私のメタマテリアル研究の発端です。FDTD で簡単に計算できると思ったのですが意外に手ごわくて、急遽、双極子近似に切り替えて結果を出したことを覚えています。当時は Ebbesen に始まる周期金属開口の異常透過が盛んで、萩行と相談して、インコメンシュレート金属開口格子からの異常透過を双極子近似で扱うことにしました。図1は格子間隔 0.5mm と

0.87mm の正方格子の透過率を双極子近似で求めたもので、開口半径は 0.05mm です。赤線の SL_1+SL_3 がインコメンシュレート格子からの透過率で、単独の正方格子 SL_1 , SL_3 からの透過率のピークが互いに干渉

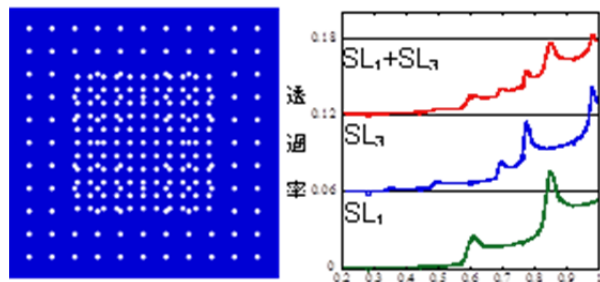


図1 周波数 (THz)

することなく現れることが分かります。この研究は2008年のスペインのメタマテリアル国際会議で発表したものですが、その後、開口サイズや金属基板の厚みの効果などを取り入れるために、日本大学郡山の神馬洋司先生の協力を

得て、現在も解析的な計算を行っています。

同じくスペインの国際会議で発表した研究に TiO_2 ボックスを単層で2次元周期配列した系の有効誘電率と有効透磁率の計算があります。この研究も萩行と相談して始めたもので、当研究室の和泉君の協力を得て Pendry の転送行列法で計算したものです。当時、負の透磁率を得るのに Pendry の提唱による分割リング共鳴器がトレンドだったので、光領域では吸収が大きいために代案の素子が模索されていました。 TiO_2 の誘電率は THz 領域で 120 と非常に高いので、その Mie 共鳴を用いて負の屈折率を得ることを目標に萩行研究室で実験と FDTD 計算がおこなわれており、それを側面から支援しようという目的でした。図 2 (a) のように $90 \mu\text{m}$ の大きさの TiO_2 ボックスを正方格子状に並べ上面から垂直に THz 波を入射させると 0.25 THz の周波数で Mie 共鳴が起こります。このとき図 2 (b) のように電場がボックス内で渦状になり、磁場がボックス内で反転します。これにより、負の透磁率を得ることができます。また、 0.35 THz では図 2 (c) のように電場がボックス中心部で反転する別な Mie 共鳴が起こり、負の誘電率が得られます。

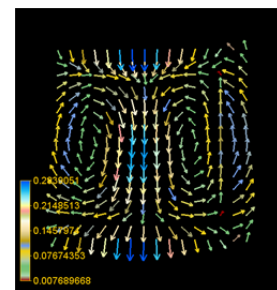
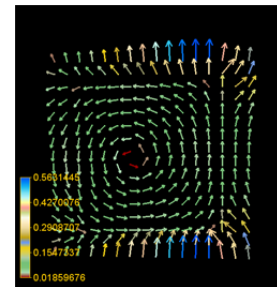
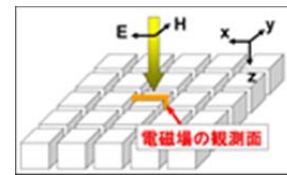


図 2 2次元配列された TiO_2 ボックス (a) と内部電場 (b)、内部磁場 (c)

3次元では計算が大変なために、2次元の角柱を配列した構造も計算しましたが、同様な結果を得ています。実際に負の屈折率を得るには同じ周波数で負の誘電率と透磁率を示す2種類のボックスか角柱を準備すればよいわけです。注目すべきは、この効果が周期性に起因するものではない事で、作製の難しい周期配列を用意する必要がない事が利点です。誘電率が高いと FDTD 計算も大変になるので転送行列法を使ったのですが、Pendry の方法では内部電場の計算精度が悪いため、中心差分を使って内部電場を求めるように改良しています。

こうした研究がきっかけとなってメタマテリアルの研究に深入りしていったわけですが、メタマテリアルで重要な点は結局は表面なのかなと最近は思い始めています。MHA にしても誘電体ボックスにしても2次元的な配列で従来にない機能を達成しようという事が目標なわけで、概括すれば、表面にさまざまな加工を施して従来にない機能を発揮させるメタサーフェスという考えが重要と思われれます。たとえば Pendry の提唱する Spoof 表面プラズモンもこの範疇に入

ります。その意味で現在注目している研究が2つあり、カイラル系の表面波と物材機構の宮崎が提唱するナノシートプラズモン共振器(NPC)です。

表面波の問題は Kats による論文があり、負まで含めた一般の誘電率と透磁率を持つ系の界面波のダイヤグラムが与えられています。表面波においても、負の屈折率問題と同様に、電磁波のエネルギーの進行方向と波数ベクトルの方向が違う場合が現れており、Kats らはこれを左手系表面波と呼んでいます。我々はこれをカイラル系に拡張した場合どのようなダイヤグラムが得られるかに関する研究を行っています。カイラル系の表面波の問題は、萩行も表面・低次元伝搬波の特性解明を計画研究に入れており、また、北野もカイラル真空などの概念を提唱しているので、このプロジェクトの重要な課題です。一般にカイラル系では電磁場はカイラルパラメータ γ を用いて

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} + i\gamma \mathbf{B}, \quad \mathbf{H} = i\gamma \mathbf{E} + \mathbf{B} / \mu$$

と書けます。パラメータ $(\varepsilon_1, \mu_1, \gamma_1)$ と $(\varepsilon_2, \mu_2, \gamma_2)$ をもつ半無限の系を接触させたとき、その接触面に局在する表面波に興味があるわけですが、パラメータが増えるために結果は簡単ではありません。一例として、真空に接する半無限平坦カイラル表面で の場合

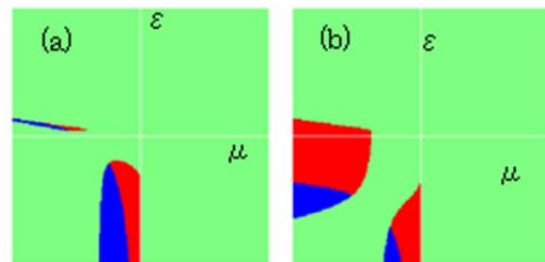
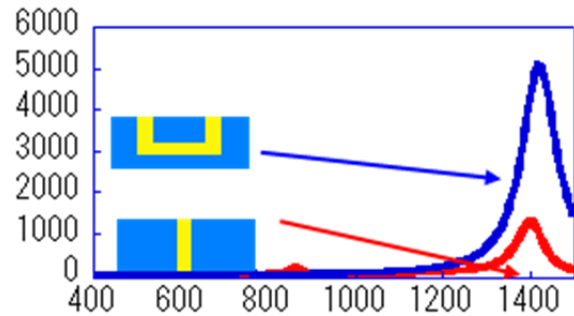


図3 カイラル系の表面波
(a)は右円偏光, (b)は左円偏光

のダイヤグラムを図3に示します。縦軸と横軸は誘電率と透磁率を表し、その範囲は です。赤は右手系表面波の存在領域、青は左手系表面波の存在領域を表します。右円偏光と左円偏光で存在範囲が違います。また、真空の代わりに透磁率を -1 とするとダイヤグラムはガラッと変わります。現在これらの点について数値的・解析的にその物理的な意味を調べています。また、接触面に周期的な変調が加わる場合のダイヤグラムについても興味を持って研究を進めています。

ナノシートプラズモン共振器 (NPC) については、境界要素法の研究で当研究室を卒業した黒川君が物材機構の宮崎の下にポスドクで移り、境界要素法で計算を行った経緯もあり、メタマテリアル以前から関心を持っていました。また、メタマテリアルの概念が出てきてからは、その表面版のメタサーフェスとして注目を集めています。当研究室でも黒川君の研究を引き継いで宮崎と共同研究を進めており、江部君がさまざまな形状のナノシート共振器でその電場増

強の特性を研究しています。図4はその一例で、深さ40nm幅30nmのコの字型のNPC(導波路幅3.3nm)に垂直に電場が入射した時の表面での電場増強度(青線)です。基板は110nmの厚さのAuで、導波路はSiO₂で埋めら



れています。長さ110nmの同じ導波路幅をもつ開口系NPC(赤線)に比べて4~5倍の電場増強度が得られています。片端閉鎖型のNPCについても同様な計算を行っており、長さ40nmのNPCで同程度の電場増強度を得ております。

計算に用いた境界要素法はFDTD法に比べて世間的にまだ馴染みが薄く、それほど盛んには用いられておりませんが次の利点があります。FDTD計算でAuのような伝導度の良い金属の系を扱う場合、表面プラズマ振動がなかなか減衰せずいつまでも残るので計算時間がかかります。一方、境界要素法ではプログラムは複雑になりますが、周波数領域で計算を行うために計算の効率は上がります。また次元も低下しますのでメモリーの節約にもなります。ただし、上記の計算は孤立系で行っているために、系を周回する表面プラズモンの効果を取り除いておりませんので、基板が半無限系の場合や周期的にNPCが配列されている場合には対応していません。これらについては現在、方法論を開発中であり、近い将来ご報告できると思います。

自己紹介ですが、私自身としてはフォトニック結晶の研究畑出身なので、メタマテリアルもある意味でフォトニック結晶を含んでその発展的拡張と捉えています。これは世間的な見方とは異なりますが、理論を扱っている以上、遊軍的にいろいろな分野に首を突っ込む習性があり、物事をできるだけ広く捉えたいと思っています。この新学術領域の提案でも理論班と称する不特定集団があちこちに出没して研究を活性化する役割の一部を期待されています。私自身も現在は境界要素法に集中している状態ですが、元来、解析的方法やFDTD法、転送行列法などのさまざまな計算手法に興味がありますので、その意味でも、少しでも皆様のお役に立てれば幸いと存じます。