

領域略称名：メタマテリアル  
領域番号：2208

平成24年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る研究経過等の報告書

「電磁メタマテリアル」

(領域設定期間)  
平成22年～平成26年

平成24年6月

領域代表者 大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授・萩行正憲



## 目次

1. 研究領域の目的及び概要	1
2. 研究の進展状況	2
3. 研究を推進する上での問題点と今後の対応策	3
4. 主な研究成果	4
5. 研究成果の公表の状況	16
6. 研究組織と各研究項目の連携状況	26
7. 研究費の使用状況	29
8. 今後の研究領域の推進方策	30
9. 総括班評価者による評価の状況	31

## 1. 研究領域の目的及び概要

研究領域名：電磁メタマテリアル

研究機関：平成22年度～26年度

領域代表者所属・職・氏名：大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・教授・萩行正憲

補助金全体の直接経費：

平成22年度 226,700千円

平成23年度 242,200千円

平成24年度 169,900千円

電磁気学に関するマクスウェルの方程式には、物質を特徴づける物理量として誘電率  $\epsilon$  と透磁率  $\mu$  が現れる。これらの量は物質に含まれる原子の種類やその配列から決定される量であるが、光領域ではスピンが光の高周波数に応答できないため自然界に存在する物質は真空と同じ透磁率  $\mu=1$  となり、さらに、誘電率がとりうる値の範囲もまた正の限られた領域となる。しかし、1960年代末にロシアの Veselago が  $\epsilon$  と  $\mu$  の両者が負の場合 (**ダブルネガティブ**と呼ばれる) に何が起こるかを考察し、光が界面で「く」の字に曲がる**負の屈折**や、平板が集光レンズになるなどの極めて異常な性質が現れることを理論的に予言した。普通の物質中では、電磁波の位相の進行方向を表す波数ベクトル  $\mathbf{k}$ 、電場ベクトル  $\mathbf{E}$ 、磁場ベクトル  $\mathbf{H}$  が右手系をなすのに対し、ダブルネガティブな物質では左手系をなすところから、**左手系物質**とも呼ばれている。また、位相の進行方向とエネルギーの流れの方向 (ポインティングベクトル  $\mathbf{S}$ ) が逆で、いわゆる後進波となる。しかし、このような物質が自然界に存在しなかったことから、Veselagoの研究は永らく忘れ去られていた。ところが、英国の Pendry により、1999年に電気回路からの類推により、電磁波の波長よりもかなり小さな金属リングに切れ目を入れた要素 (分割リング共振器) が LC 共振により大きな磁気的な応答を示し、さらに金属細線と組み合わせた人工構造によりダブルネガティブ即ち負の屈折が実現できることが理論的に示され、2000～2001年にかけて米国の Smith らによって、マイクロ波領域において負の屈折率が実現できることが実験的に示された。単にこの構造のスケールを小さくするだけでは光領域の負の屈折率は実現できないが、現在、構造の工夫と超微細加工技術により、2次元的ではあるが負の屈折率が実現されている。波長よりも十分小さな要素 (メタ原子と呼ばれる) をうまくデザインして配列し、ダブルネガティブのみならず、有効誘電率や有効透磁率が自然界ではありえないような値をとる人工物質を**メタマテリアル**と呼んでいる。

本研究領域では、メタマテリアルの概念が基本的には電磁波の波長によらずに共通であることを積極的に利用し、マイクロ波、テラヘルツ波、光波までの研究者が密接に連携して、次のような目標に向かって研究を進める。即ち、

1. 多様な手法を駆使した3次元メタマテリアルの作製
2. 偏光制御メタマテリアルの作製と電磁波伝搬特性の解明
3. 負の屈折率メタマテリアルにおける未実証現象の検証と新奇現象の探索

このような広い周波数領域で連携して行うメタマテリアルプロジェクトは世界的にもユニークである。

研究項目は、A01 電磁波 (マイクロ波) メタマテリアル と A02 光メタマテリアルで、計画研究は、それぞれ A01が、ア (真田)、イ (萩行)、ウ (北野)、および、A02が、エ (石原)、オ (田中)、カ (迫田) から成り立っている。

## 2. 研究の進展状況

メタマテリアルは、電磁波の周波数によらない共通の概念ではあるが、母材（主として金属）の電磁的性質がマイクロ波と光領域ではかなり異なること、また、要求される試料のサイズが異なるために加工法ならびにその要求精度が大きく異なることから、研究項目として、**A01 電磁波（マイクロ波・テラヘルツ波）メタマテリアル** と **A02 光メタマテリアル** を設定した。両電磁波領域では、電磁波の捉え方にも大きな隔たりがあるが、両領域の研究者がお互いの考え方を理解し、相互にメリットがあるよう、できるだけ交流を持つような機会を作った。各研究項目の進展状況は以下の通りである。

### A01 電磁波（マイクロ波・テラヘルツ波）

マイクロ波領域で面心立方格子状に配列した金属球とワイヤーで構成された等方的3次元負の屈折率（左手系）メタマテリアルを設計・試作した。この負の屈折率メタマテリアルを用いて平板スーパーレンズを作製し、波長以下の分解能を実験的に確認した。マイクロ波、テラヘルツ波両領域で誘電体により構成したメタマテリアルを考案・試作し、特性を評価した。

カイラル（旋光性）メタマテリアルについて、一般偏光に対するブリュースター現象の条件を見出した。電磁波の群速度の制御をめざし、メタマテリアルをうまくデザインし、電磁誘起透明化（EIT）現象とフラットバンドを実現した。マイクロ波領域での実証を行い、群速度が広い範囲で制御できることを見出した。また、メタ原子の二重共振を利用し、マイクロ波領域での非線形光学効果により第2高調波の発生効率が格段に向上することを見出した。

メタマテリアルのデバイス応用については、マイクロ波領域で伝送線路型左手系媒質を多層積層した超小型超広帯域（UWB）無線フィルターおよび超小型インピーダンス変成器を開発した。また、零次共振を用いた偏波制御可能なアンテナを作製し、さらに、磁性体を用いた非相反メタマテリアルを進行波型共振器アンテナに適用した。テラヘルツ波領域では、メタ原子付きテラヘルツ波放射用光伝導アンテナを提案し、放射スペクトルや偏光がダイナミックに変調できることを実証した。

気体プラズマを用いたメタマテリアルでは、放電状況により動的に負の屈折率状態が生成できること、また、強いマイクロ波入射により負の屈折率が生成され透明化する現象を実証した。

### A02 光メタマテリアル

光領域では、この2年間は構造作製のための要素技術の確立に重点を置き、様々な手法での作製を試みた。

トップダウン的手法による作製では、金属/絶縁体多層膜を基本とするメタマテリアルの作製において、層厚の精密な制御と絶縁体層の酸素抜けを防ぐ工夫を行った。偏光制御メタマテリアルの作製のために、独自のナノコーティングリソグラフィ法を用いて、高アスペクト比の金ナノフィン構造を作製した。ボトムアップ的手法では、DNAテンプレートを用いて、金属ナノ粒子を円環状に配列、接続させて、メタマテリアルの共振器を水溶液中で自己組織化的に作製することに成功した。磁場印加により動的に金属微粒子をリング状に並べる手法も確立している。さらに、植物のらせん形態の器官をメッキすることにより大量のマイクロらせん構造を作製することに成功している。

早い時期でのメタマテリアルの応用を目指して、金属/絶縁体/金属微小共振器を2次元に配列したメタ表面を作製した。この共振器中の任意の位置に発光体である希土類イオンを導入する手法を確立し、その位置に依存して磁気双極子遷移強度が増大されることを確認した。

A01とA02班の連携研究も行われ、例えば、A01班の右手/左手系複合伝送線路型メタマテリアルの設計手法を、A02班が群論的手法で一般化し、波数ゼロ（ $\Gamma$ 点）近傍で線形なバンドの分散関係（ディラックコーン）が現れる条件を明らかにした。また、A02班の植物由来のマイクロらせん構造分散試料をA01班で評価し、テラヘルツ波領域で光学活性が発現することを実証した。

### 3. 研究を推進する上での問題点と今後の対応策

我が国のメタマテリアル研究は、欧米に比べて歴史が浅く、この新学術領域研究が最初の組織だった研究プロジェクトである。そのため、研究者の層がまだ薄く、新学術領域関係の研究者のみでは欧米に対抗していくには十分ではないと感じている。そこで、この分野の研究者を増やす目的で、毎年、チュートリアル講演を含む公開講演会を開催している。平成22、23年度ともに、若手研究者、学生、企業研究者を含み300名を超える聴講者が参加する盛況で、メタマテリアルに関する社会的関心は着実に上昇してきている。また、日本学術振興会の先導的研究開発委員会「電磁メタマテリアルの開発と応用」ならびに国際高等研究所プロジェクト「電磁メタマテリアルの開発と応用」(共に平成21～23年度のプロジェクト)とも連携し、年数回泊りがけの研究会にて、自由な議論を行った。これらの企画により、マイクロ波と光領域の研究者の交流が深まり、それぞれの研究に新しい概念が導入されたり、共同研究へと発展している。また、化学分野との連携のために日本電磁波エネルギー応用学会の中に「メタケムワーキング」を立ち上げたり、新学術のメンバーが中心となり設立したバイオテンプレート研究会でメタマテリアルの講演を行ったり、また、マイクロマシン/MEMS関連協会においてメタマテリアル研究を進める計画の立案に協力したり、など、メタマテリアル研究のすそ野を広げる努力を行っている。

領域内での連携で問題となっているのは、標準試料の準備、ならびに、試料の評価である。テラヘルツ波領域では、リソグラフィや超微細インクジェットプリンタを用いて比較的簡単に標準試料を作製し、提供することが可能であり、実際、領域内外のいくつかの研究グループに試料が提供された。評価についても、領域内に複数のテラヘルツ時間領域分光装置を保有しており、それらが有効に機能している。問題は光領域の標準試料で、現状では要求に応じて領域内で試料を作製するのはかなり困難である。これは、試料作製そのものが研究対象であるため、サービシ的に試料を作製するのに相当の労力を伴うからである。この状況に対処するために、ナノインプリント工法で簡便に分割リング共振器配列を作製することに成功している企業の研究者がいるので、そこからの供給の検討をお願いしている。光領域での試料評価においては、透過や反射の位相スペクトル測定はやや特殊な装置が要求される。また、測定結果から、有効誘電率や有効透磁率を導出する過程でノウハウが必要である。これまでは、領域内の研究者間で個別に対応してきたが、特に公募の研究者から窓口が欲しいとの要求があり、至急に対応したいと考えている。

シミュレーション用のソフトウェアの評価について、使い勝手や精度に関する情報が欲しいとの要望がある。また、独自開発のプログラムや市販のプログラムについて、信頼性を含む比較が欲しいとの要望もある。使用するソフトウェアによって結果が異なるということもよく経験することであるので、領域内の研究者によるソフトウェアの使用に関する具体的な経験を収集し、領域内で公開することにより、シミュレーション開発や使用法のレベル向上につなげたいと考えている。

若手研究者の育成については、全体会議のポスター発表などでの討論を行ってきたが、若手研究者が企画する研究会などを通じて、より研究のモチベーションを上げる必要があると考える。

#### 4. 主な研究成果

メタマテリアルとは、波長よりも小さな微細構造により有効誘電率や有効透磁率を制御した人工物質と定義されるが、電場が磁気双極子を誘起したり、磁場が電気双極子を誘起したりするような特異な物質をデザインすることもでき (カイラル媒質と呼ばれ、新しい物性材料であるマルチフェロイック物質にも似ている)、また、微細な制御が可能な共鳴人工原子 (メタ原子) 単体としても、新機能を発揮することができる。さらに、光領域でのプラズモニクスとも関連するし、電磁波の波長がメタ原子の大きさに近づくと、フォトニック結晶的な性質も出てくる。本領域では、単に有効誘電率や有効透磁率の設計だけでなく、これらの周辺の分野との関係も意識しつつ研究を進めている。

#### A01 電磁波 (マイクロ波・テラヘルツ波) メタマテリアル

##### 1. メタマテリアルの設計と作製

マイクロ波領域において、図1(a)に示されるような面心立方格子状に配列した金属球をワイヤーで接続した構成により、偏光方向に依存しない等方的3次元負の屈折率メタマテリアルを提案し、光硬化樹脂を用いた3次元プロトタイピング工法と表面電気化学処理 (金属メッキ) により試作を行った (真田 A01 イ)。図1(b)はシミュレーションによるバンド構造を示すが、最も低周波数のバンドが負の群速度を示し、負の屈折率が実現されている。実験的に負の屈折率を確認するとともに、平板型スーパーレンズ試料において空間分解能が回折限界を超えていることを確認した。他の構成法として、

開口配列を有する金属板導波路が、偏光が平板に平行な場合は実効的に負の誘電率を示し、一方、高誘電率の微小誘電体共振器の最低次のミー共鳴が磁氣的応答を示して有効透磁率が負となることに着目して、図2に示す負の屈折率物質を作製した (上田 A01 ア)。この構造は一見異方的であるが、構造

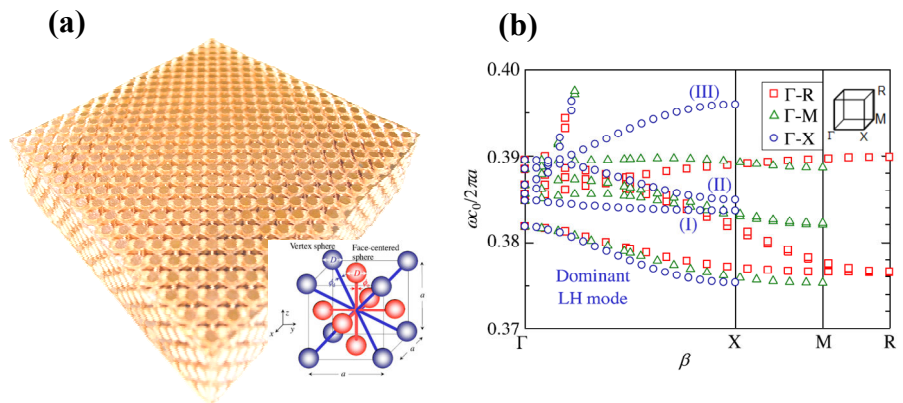


図1 (a) 金属球とワイヤーで構成した等方的3次元負の屈折率メタマテリアルと (b) シミュレーションによるバンド構造

パラメータの調整により等方的な分散関係のメタマテリアルとなる。これらは共に本研究での独自構造の等方的なバルクメタマテリアルである。テラヘルツ波領域での等方的メタマテリアルについては、磁氣的メタマテリアル (透磁率が負) を目指して、これまで作製、評価してきたTiO<sub>2</sub>を用いた2次元誘電体立方体配列メタマテリアルを発展させた、TiO<sub>2</sub>微小球をベンゼン中に分散した3次元系について予備的な測定を行い、透磁率の1からのずれを確認した (萩行 A01 イ)。

テラヘルツ波領域のメタマテリアルについては、簡便かつ高精度の作製方法として超微細インクジェットプ

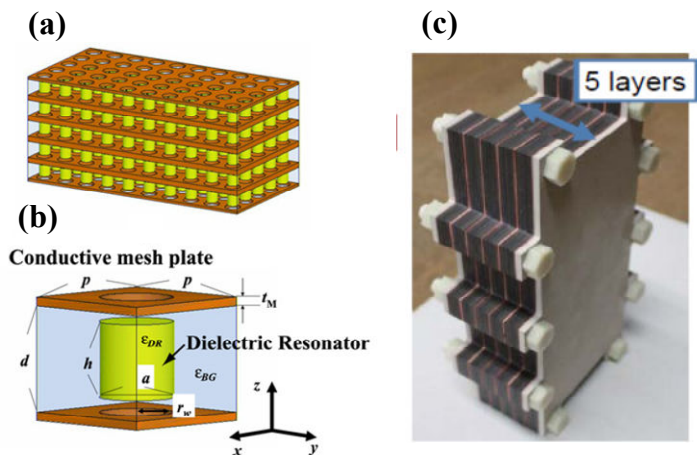


図2 誘電体微小共振器と金属開口配列平板で構成される3次元メタマテリアルの (a) 模式図、(b) 単位構造、および、(c) 写真

リント工法の有効性を実証してきたが、本研究で多層構造の作製、並びに、図3に示されるような基板から立ち上がった磁気的メタ原子 (U字型共振器) 配列の作製技術を確認した (萩行 A01 イ)。このような配置の共振器は、電磁波が基板に垂直に入射する場合において、磁場がリングを貫き磁気的な応答を示すために必要不可欠である。従来は立体配置を実現するためには、複雑なリソグラフィ工程やMEMS技術を必要とした。図3(c)は透過スペクトルを示したもので、0.9 THz付近に磁気的な共鳴構造が現れている。また、レーザー加工装置を立ち上げ、金属薄板に穴をあけた相補的な平面分割リング共振器配列を作製し、そのテラヘルツ透過スペクトルが、バビネの原理に従い通常の分割リング共振器配列とは逆のスペクトルを示すことを確認した。さらに、テラヘルツ波近接場顕微鏡を試作し、この試料の電場の近接場分布が予想通りとなっていることを確認した。また、テラヘルツ波エリプソメトリー分光装置や高強度テラヘルツ波発生装置も組み上げているので、今後、これらの装置をメタ材料中での非線形を含むテラヘルツ波伝搬の測定に活用する予定である。

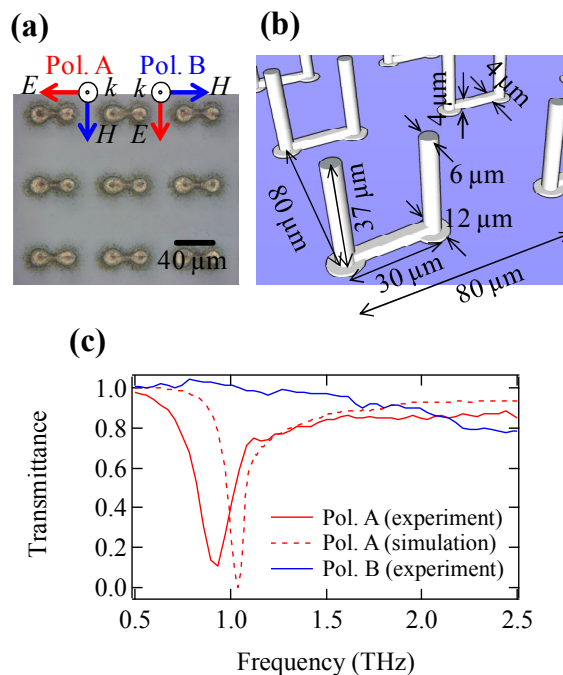


図3 超微細インクジェットプリンタで作製した、基板から立ち上がったU字構造共振器配列メタ材料の (a) 写真、(b) 模式図、および、(c) テラヘルツ波透過スペクトル。

## 2. 新奇的な機能の実現

通常、ある目的の性質を有する物質の合成には熱力学的な安定性を利用する。また、場合によっては薄膜作製などにおいて熱力学的な非平衡を利用する場合もある。いずれの場合も、要素となる原子や分子の形や配列の自由度は制限されており、かつ離散的にしか制御できない。メタ原子は、原子に比べて非常に大きなマクロな要素であり、マイクロ波やテラヘルツ波領域では数十ミクロンからセンチメートルの大きさで、構造パラメータを連続的に変化させることができる。原子や分子レベルの量子力学的な性質はないが、その代わりに共鳴周波数や対称性の微妙な調整が可能である。このような性質を利用して新奇的な機能や非線形性の増強などを実現した。

光領域で電磁誘起透明化 (EIT) として知られる現象があるが、これは量子力学的現象で、基本的には基底状態との遷移が許容な準位と禁制な準位間の結合をレーザー光で制御して、狭い周波数領域で物質を透明化させるものである。このような現象は、古典的な振動子系でも実現できることが知られている (EITの古典的アナログ)。図4は

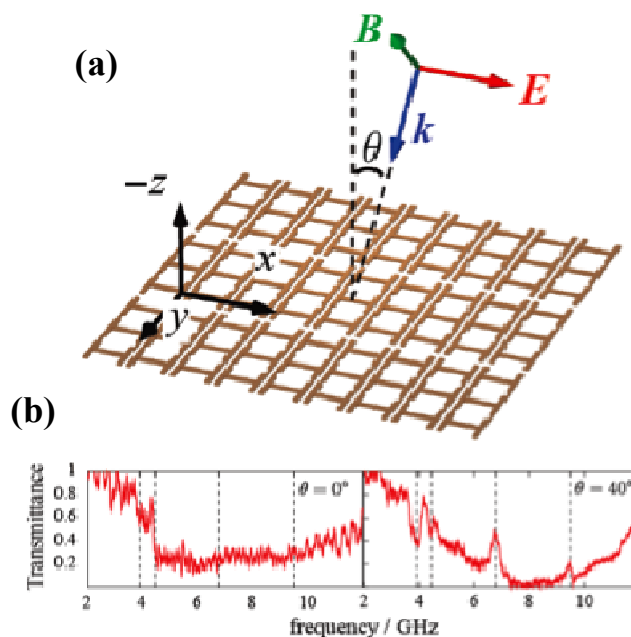


図4 (a) 電磁誘起透明化現象のためのメタ材料の構造と (b) 透過スペクトルの入射角依存性



メタ原子構造を巧みに設計することで、許容と禁制の2つのモード間の結合強度の制御を入射電磁波の電場強度の傾斜で可能としたものである (北野 A01 ウ)。図4(b)に示されるように、マイクロ波の入射角を垂直入射から40度の斜入射に変化させると7 GHz付近に鋭い透過帯が現れるが、測定からこの付近で群速度が低下しているのがわかった。また、入射角を変化させることにより、群速度を真空の値

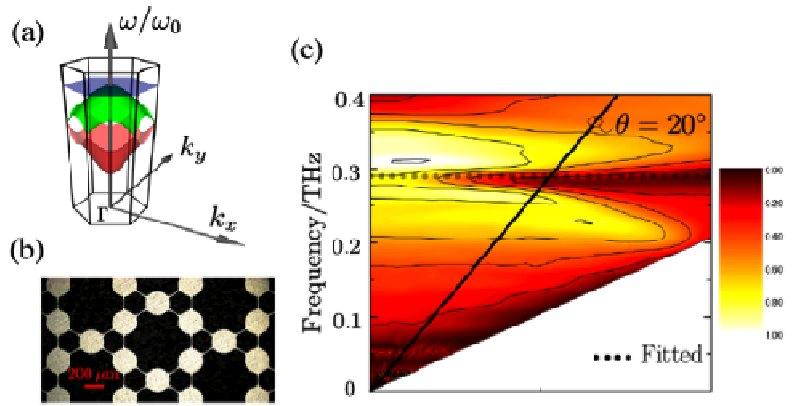


図5 (a) フラットバンド (青) と (b)それを実現するためのカゴメ格子、および、(c) その測定されたバンド図

の1/188から1/694までの広い範囲で変化できることがわかった。

カゴメ格子状に組み込まれた結合共振器系において、バンド特性が図5(a)の青で示したように平坦になるフラットバンド現象が発現することを明らかにした。フラットバンドにおいて励振波の群速度は全方位で0になる。これを実証するために、図5(b)のようなカゴメ格子状の金属ディスクからなるメタ材料を作製し、テラヘルツ時間領域分光法により透過率を測定した結果、図5(c)のようなバンド図が得られた (北野 A01 ウ)。0.3

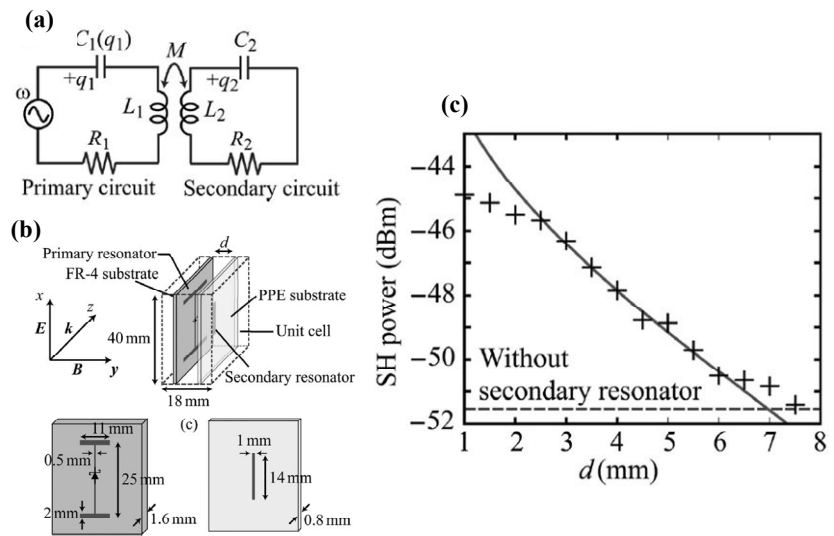


図6 (a) 基本波と第2高調波の二重共振非線形メタ材料の概念図、(b) そのユニットセル構造、および、(c) 第2高調波強度のメタ原子間距離  $d$  依存性

THz付近の透過率の低いところがフラットバンドに対応しており、広い領域で平坦になっていることが確認できる。この様なフラットバンド現象をメタ材料において実証したのはこれが初めてである。

メタ材料中では電場が特異な分布をするため、非線形光学効果の増強が起こることが期待される。既に、基本波に共振する非線形メタ材料から効率良く第2高調波が発生することが知られているが、この考え方を拡張し、第2高調波に対しても共振する結合共振型メタ材料を利用することでさらに効率を増大することを提案した (図6(a)、北野 A01 ウ)。これを実証するために、図6(b)に示されるような可変容量ダイオードを導入した結合分割リング共振器非線形メタ材料を用いた実験を行ったところ、図6(c)に示されるように、基本波と第2高調波に共振するメタ原子間の距離を近づけるにつれて第2高調波の増大が起こり、従来の単一構造の分割リング共振器を用いた場合に比べて約100倍の強度の第2高調波が観測された。

### 3. デバイスへの応用

マイクロ波からテラヘルツ波領域では、近い将来のメタ材料の実用デバイスへの応用も重要な研究ターゲットである。

メタ材料を用いたマイクロ波デバイスの特徴のひとつは小型化であるが、従来の1次元

型メタマテリアルデバイスを発展させ、積層型のメタマテリアルを設計し、さらなる小型化と高性能化を実現した (堀井 A01 ア)。作製にはLTCC (Low-Temperature Co-fired Ceramics) 多層技術を用いた。図7(a)は作製したインピーダンス変成器の模式図で、(b)はその写真である。5 GHz (波長は 6 cm) 付近で動作する超広帯域デバイスであるが、写真からわかるように波長に比べて極めて小さい。インピーダンス変成器の他、フィルターなどの様々なデバイスへの応用も行った。性能も従来のデバイスに比べて優れているが、現在の市場投入への問題点は工程に起因するその価格にある。

負屈折率媒質に磁性体を組み込むことで非相反性を持たせたメタマテリアルを考案・試作し、その特性を実験的に検証するとともに、進行波共振器アンテナの性能向上に応用した (上田 A01 ア)。ここで、非相反性とは、電磁波の伝搬特性 (例えば、位相速度) が、右方向伝搬と左方向伝搬で異なることである。通常の電磁波のバンド図では、時間反転対称性のために、逆格子空間の波数ゼロの点 ( $\Gamma$ 点と呼ばれる) に対して、分散が左右対称になる。しかし、磁性体を組み込むと時間反転対称性が破れ、図8(a)に示されるように、対称になる波数が $\Gamma$ 点からずれる。このことは、右方向と左方向の伝搬で特性に差が出ることを意味している。そこで、この性質を利用したマイクロ波デバイスの例として、図8(b)に示されるような磁性体であるフェライトを組み込んだ進行波型共振器アンテナを提案・作製した。このアンテナの特性で新奇なのは、導波路を右方向に伝搬するマイクロ波

は右上方向に放射されるが、それを反射させた左方向に伝搬するマイクロ波は、通常の場合と異なり、やはり右上方向に放射されることである。このことを利用して、図8(c)に示されるように、アンテナの放射効率を向上させることに成功した。方向が逆になると伝搬特性が異なる現象は、マルチフェロイック物質で見られる電磁波伝搬やカイラルエッジ状態とも関連する現象として、領域内の物性物理学研究者の興味を引きマイクロ波工学研究者との共同研究がスタートしている。この様な連携は、これらの分野ではこれまではほとんどなかったことである。

テラヘルツ波領域では、フェムト秒レーザーを励起源とする半導体光伝導アンテナが広帯域テラヘルツ波光源として多用されている。特定の共振周波数を有するメタ原子をこの光伝導アンテナに装荷すると放射スペクトルと偏光特性が大きく変化することを示した (萩行 A01 イ)。さらに図9(a)に示されるように、分割リング共振器のギャップ部にフェムト秒レーザーパルスを照射して電氣的にこのギャップを閉じると、図9(b)に示されるように放射されるテラヘルツ波のスペ

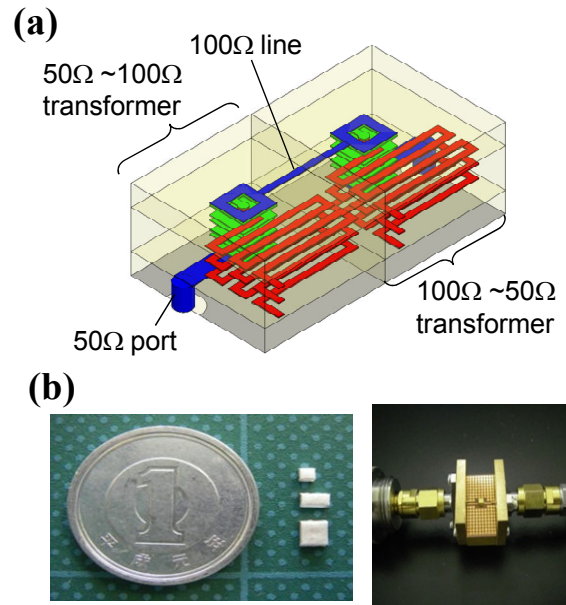


図7 (a) マイクロ波用積層型メタマテリアルインピーダンス変成器と (b) その概観

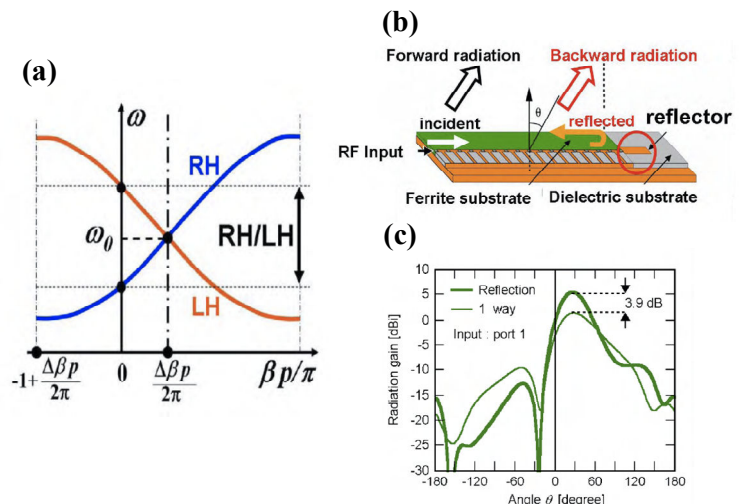


図8 (a) 非相反右手/左手系複合メタマテリアルにおけるバンド図、(b) フェライトを装荷した進行波型共振器アンテナ、および、(c) その放射効率

クトルと偏光特性が大きく変化することを明らかにした。このようなダイナミックなスペクトル制御は、通信用のフォトニックテラヘルツデバイスとして有用である。なお、このデバイス作製においても先に述べた超微細インクジェットプリンタを活用した。また、テラヘルツ波領域では、ナノインプリント工法を用いて、極めて安価で高性能かつフレキシブルなワイヤグリッド偏光子（一種の極めて異方的な平面メタマテリアルと見做せる）を作製した（萩行 A01 イ）。

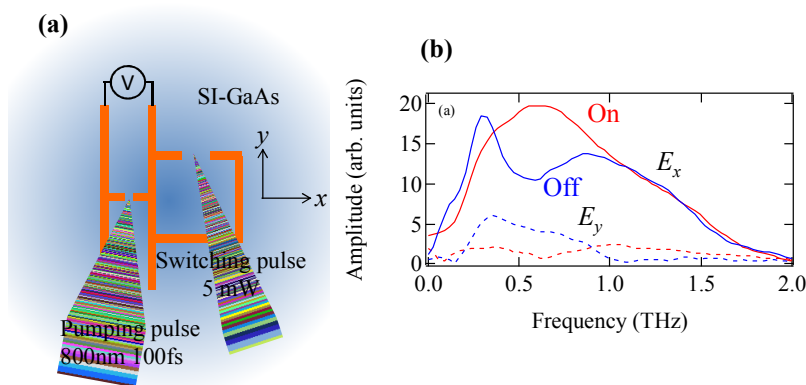


図9 (a) メタ原子装荷光伝導アンテナの模式図と (b) テラヘルツ波放射スペクトルの動的変調

#### 4. プラズマメタマテリアル

電離気体プラズマはマイクロ波領域では負の誘電率を有する媒質である。気体の中に、負の透磁率を生成するためのメタ原子を配置し、気体を電離させれば、気体の種類や放電状態に対応して、この系の有効屈折率をダイナミックに変化させることが可能となる。このような発想の研究は、世界的に見て本領域特有のものである（酒井 A01 ウ）。

図10(a)はガラスキャピラリー中に二重らせん型金属線を入れた構造で、二重らせんが負の透磁率を、キャピラリー中の電離気体が負の誘電率を実現する。図はマイクロ波のSパラメータ（複素振幅透過率）の実部と虚部の値を、気体の種類と放電状態をパラメータとしてプロットしたもので、この図からこの系の有効屈折率が変化しているのがわかる。

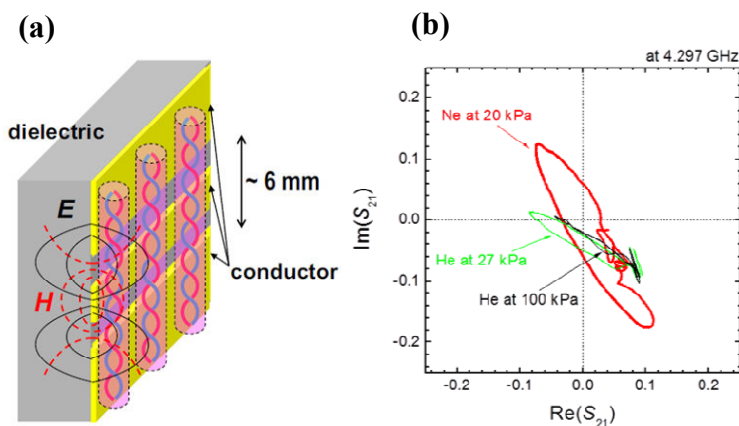


図10 (a) プラズマメタマテリアルの構造と (b) マイクロ波透過率 (Sパラメータ)

次に、強いマイクロ波を照射した場合の非線形現象について記す。図11(a)は試料の模式図で、容器中に分割リング共振器が並んでいる。この容器に気体を満たし、強いマイクロ波を左から照射した。この系でマイクロ波の強度を増加するに従い、透過強度が増大することを見出した。分割リング共振器がない場合は、マイクロ波強度の増加とともに気体の電離度が増し、誘電率が負となることから透過は減少すると考えられるので、これとは逆の現象である。これは、分割リング共振器配列が負の透磁率を有しており、そこに強い

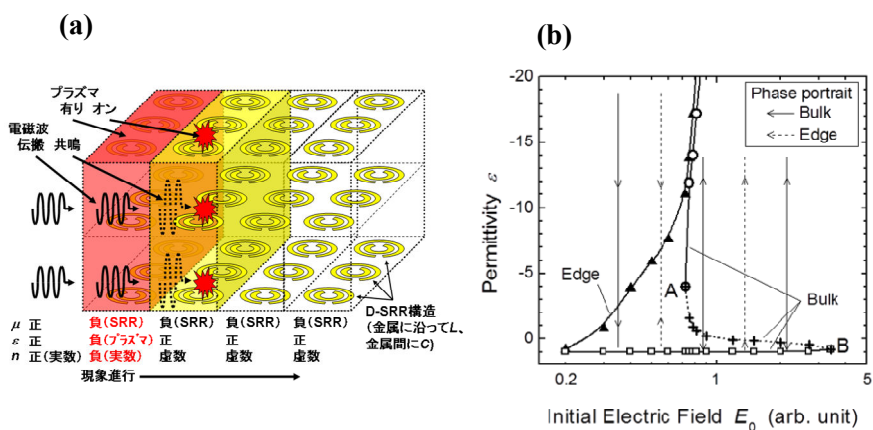


図11 (a) プラズマメタマテリアル中の高強度マイクロ波の非線形伝搬の模式図と (b) 誘電率のパワー依存性

マイクロ波が入射すると表面から少し侵入したマイクロ波が気体を電離して負の誘電率の部分  
を生成し、その結果表面は負の屈折率となり、マイクロ波はいっそう侵入する。この侵入したマ  
イクロ波は、さらに奥の気体を電離し屈折率が負の部分がさらに増えるということになり、だん  
だんマイクロ波が奥に侵入していく。つまり、マイクロ波は自身で負の屈折率領域を生成し、こ  
れによって透過領域をどんどん右に広げて透過するということになる。図11(b)は、誘電率の入  
射マイクロ波強度依存性を示したもので、この物理過程を支持している。

## 5. その他の成果

物質の界面には、条件が整えば界面波が存在できることが知られている。例えば、金属表面（金  
属は負の誘電率物質）を伝搬する表面プラズモンポラリトン（SPP）である。これまで、負の透  
磁率を含む様々な組み合わせのメタマテリアル界面に界面波が存在する条件と、その特性（TE  
波かTM波か、前進波か後進波か）が明らかにされている（高原 A01 公募、および海外の研究）。  
本研究ではこれをさらに拡張し、カイラル媒質（電場と磁場が構成方程式において直接結合して  
いる系）の場合について、その界面波の存在条件を明らかにした（宮崎 A01 イ）。この条件は、  
カイラル界面（あるいは表面）の励起モードを利用して、電磁波の偏光変換を行う素子を開発す  
る時に重要な指針となると考えられる。

メタマテリアル中の電子ビームによる電磁波発生については、逆方向のチェレンコフ放射が予  
言されており、その実証に興味を持たれている。逆方向のチェレンコフ放射実証の前段階として、  
中空型誘電体管中を加速器からのMeVオーダーのエネルギーの電子ビームバンチを走らせるこ  
とにより、離散的な多モードのテラヘルツ波を発生させることに成功した（菅 A01 公募）。電子  
は中空部分を高速で走り、発生したテラヘルツ波は誘電体の部分を主に伝搬するためチェレンコ  
フ放射が起こる（テラヘルツ波の伝搬速度は誘電体中では電子より遅い）。この誘電体部分を負  
の屈折率物質に置き換えて、逆方向のチェレンコフ放射を実現するのが次の目標である。

電子ビームに関連した現象では、スミス-パーセルテラヘルツ波放射の理論的研究も行った  
（萩行 A01 イ、領域外のレーザー総研 李との共同研究）。この研究は先の逆チェレンコフ放射と  
ともに、領域代表者が本領域発足直後に開催した、電子ビームによる複雑構造体からのテラヘル  
ツ波放射に関するミニ研究会から派生したものである。スミス-パーセル効果とは、金属回折格  
子上を電子バンチが通過するときに電磁波が発生する現象であるが、近年、表面回折格子上の表  
面波が、自由電子レーザー発振に寄与することがわかり研究が活発化している。領域代表者は、  
スミス-パーセル自由電子レーザーで議論されている表面波が、Pendryらが発見した、表面微細  
構造を有するメタ表面（デザイナースurfaceとも呼ばれる）で存在する疑似表面プラズモンポラ  
リトン（Spoof SPP）と本質的に同じものと気づき、自由電子レーザーとメタマテリアルの分野を結  
び付けようとしてこの研究会を企画した。この研究の結果、Spoof SPPによりテラヘルツ自由電  
子レーザーの発振特性を向上する方策を提案するとともに、負の屈折率メタマテリアルを表面回  
折格子の素材として用いた場合の、スミス-パーセルテラヘルツ波放射特性の理論的検討を行っ  
た。

## A02 光メタマテリアル

### 1. 様々な手法によるメタマテリアルの作製

光領域のメタマテリアル研究における大きな目標のひとつは、バルクな3次元メタマテリアル  
の作製である。これまでの光メタマテリアルの作製では、電子線リソグラフィや集束イオンビー  
ム加工が中心であり、主に平面メタマテリアルが作製され、厚みのある試料作製の研究は少ない。  
積層型のメタマテリアルにおいても、波長以下の厚さにすぎず、バルクなメタマテリアルとはと  
ても言えない。100 nm程度の大きさのメタ原子を大量に作製するのは現在のナノテク技術を用  
いても非常にハードルが高い。光領域のバルクなメタマテリアルの作製には従来にない技術が必  
要となる可能性もあるため、この2年間ほどは、様々な作製法の開発を行ってきた。

まず、トップダウン的手法について記す。光領域の負の屈折率物質を実現する構造としては金

属薄膜と誘電体薄膜を積層し加工したいいわゆるフィッシュネット構造が有用であるが、屈折率のFOM (Figure Of Merit、複素屈折率の実部を虚部で割り算した量で、この値が高いほど吸収の影響を避けて明瞭な負の屈折が得られる) を高くするためには、膜厚を厳密に制御し界面のラフネスをできるだけ抑えねばならない。このため、多層膜作製のイオンビームスパッタ装置を導入した (石原 A02 エ)。酸化物の酸素抜けを防ぐため、酸素ガスを導入できるようにし、また、多層膜の自動積層が行えるよう、印加電圧とシャッターの開閉を外部から精密制御できるように装置を改造した。また、レーザーエリプソメトリを用いた成長のその場観察装置を開発中である。この装置は東北大に設置されたため、昨年の大震災で損傷を受けたが幸い大事には至らず、若干の計画の遅れが出たにとどまっている。

金属ロッド対は磁氣的応答を示すことが知られているが、その変形として金ナノフィン配列構造体を作製した (藤川 A02 オ)。金属アルコキッド溶液に固体基板を浸漬し、矩形ナノチューブを作製する技術を発展させ、異方的エッチングにより図12に示されるような、線幅が 30~40 nmで高さが500 nm 近くもある背高なナノフィン構造を作製することに成功した。図12(b)に示されるように、このフィン間隔は精密に制御可能で、間隔に応じて吸収スペクトルが変化しているのがわかる。この構造は、フィンが基板から立ち上がっているという特徴があり、基板に光が垂直に入射する場合でも磁場がフィン対を貫くことが可能で、磁気応答が発現する。また、ワイヤーグリッド型の偏光子としてもユニークな構造である。この構造から出発して、図の縦方向にも周期的構造を導入することで、有効誘電率と有効透磁率の制御を行うのが次の目標となる。

フェムト秒レーザーの第2高調波の干渉を用いて金属板を加工し、様々な表面周期構造を作製する研究も行った (中田 A02 公募)。光を絞って走査する手法に比べると、大面積を一気に加工できる有利さがある。問題は、走査型の加工に比べて個々の単位構造の形状制御の自由度が小さい点であるが、独自の4および6光束干渉法により、金属平面上に様々なパターンが現れることをシミュレーションにより確かめた。この中には、分割リング共振器の形状をしたものもある。今後、この装置を使って、実際の金属周期構造を作製する予定である。

以上は、トップダウン的な作製法であるが、その方法からわかるように、まず、平面構造を作製するというのが基本で、積層する場合も、波長よりも厚くする (例えば数ミクロン程度) のは困難である。そこで一気にバルクな構造に迫るためにボトムアップ的な手法の開発も行った。

これまで、光領域で磁気応答を示す分割リング共振器として、マルチギャップ構造の分割リング共振器を提案してきている (田中 A02 オ)。この構造は見方を変えると図13(a)のように金属微粒子を並べた構造となる。この構造を作製するための第1歩として、図13(b)に示されるような、金ナノ粒子とDNAが結合した3種類のビルディングブロックを設計し、水中でこの3つを水素結合してリング状に組織化することにより金ナノ粒子3量体リングを作製した (田中 A02 オ)。この3量体を石英基板上に固定化し原子間力顕微鏡で観測した像が図13(b)右である。図13(c)に単量体と3量体の透過スペクトルを示すが、後者は前者に比べて吸収バンドが長波長にシフトしている。これは、粒子間の表面プラズモンの結合が増大したことを意味しているが、今後、この構造

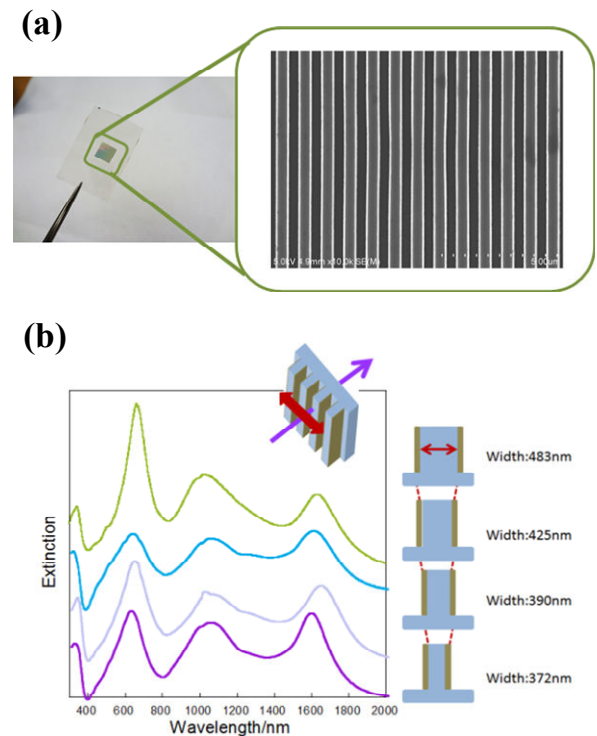


図12 (a) 薄膜塗布と選択的エッチングにより作製した金ナノフィン構造と (b) 吸収 (消光) スペクトル

の分割リング共振器としての磁気応答特性を明らかにしていく予定である。なお、本作製法は、金ナノ粒子、DNA共に大量合成でき、リング構造の作製は混合するのみなので、3次元バルク試料作製に最も適していると考えられる(周期的配列はこの場合必ずしも必要ない)。

光領域で機能する100 nmサイズの分割リング共振器を作製するために、図14(a)に示されるようなポリスチレン微小球をマスクにして金属蒸着とドライエッチング処理を利用する微小球リソグラフィを考案した(岡本 A02 カ)。これまで、集束イオンビームを用いて作製を試みて思うような形状のものができなかったが、この手法により図14(b)に示されるような分割リング共振器形状の試料が作製できた。この試料の散乱スペクトルを測定したところ図14(c)のような結果が得られ、シミュレーションとも一致したことから所望の分割リング共振器が作製できたことを確認した。

なお、この分割リング共振器は、これまでの最小レベルの大きさであり、リングの穴のくびれも従来の手法で作製したものに比べてくっきりしている。まだ均一な試料が作製できるまでには至っていないが、まずは基板上に均一な形状の試料を多数作製することを次のステップとした。なお、図13(c)と図14(c)を比較すると後者の方が鋭い共鳴を有しているように見える。微小球リソグラフィは現時点では2次元であり、DNAを用いる手法に比べるとバルク作製法としては劣るが、メタ原子の特性では勝っているかも知れない。

近年急速な発展を遂げている超分子化学的手法からのアプローチも行っている(藪 A02 公募)。図15に示すように、サイズのそろったサブミクロンサイズのポリマーコロイド粒子分散液を塗布・乾燥することにより、コロイド結晶を作製し、このコロイド結晶を鋳型としてポリビニルアルコールなどにより鋳型を取ることで、サブミクロンサイズの空孔が穿たれた逆オパール構造が形成できる。さらに、ブロック共重合体と金ナノ粒子を混合した溶液を塗布・乾燥することにより、空孔内に同心円状のマイクロ相分離構造が作製され、そのマイクロ相分離構造に沿って金ナノ粒子の配列を形成することに成功した。これも、多重ギャップを有する分割リング共振器類似物と見做すことができる。

マイクロ波領域では、真田ら(A01 ア)がマッシュルーム型(傘型)の構造を密に2次元的に並べた金属構造で、伝送線路型の2次元の負の屈折率物質を実現している。光領域でもこの形状

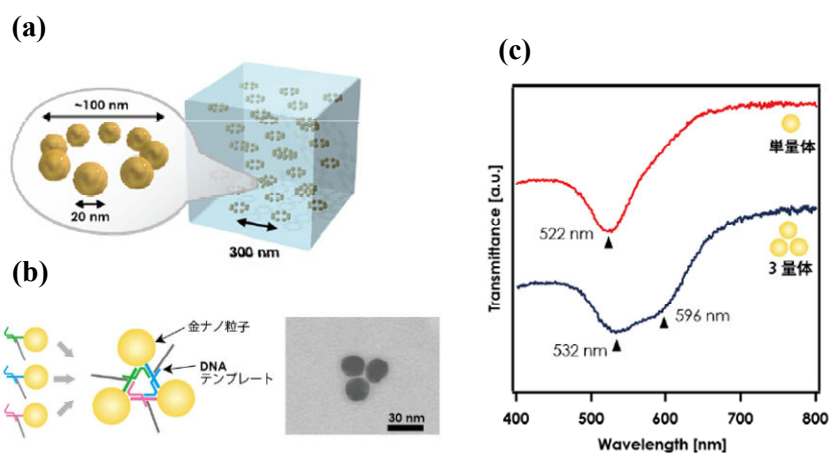


図13 (a) 金微粒子リング構造、(b) DNA結合金微粒子、および (c) 単量体と3量体の透過スペクトル

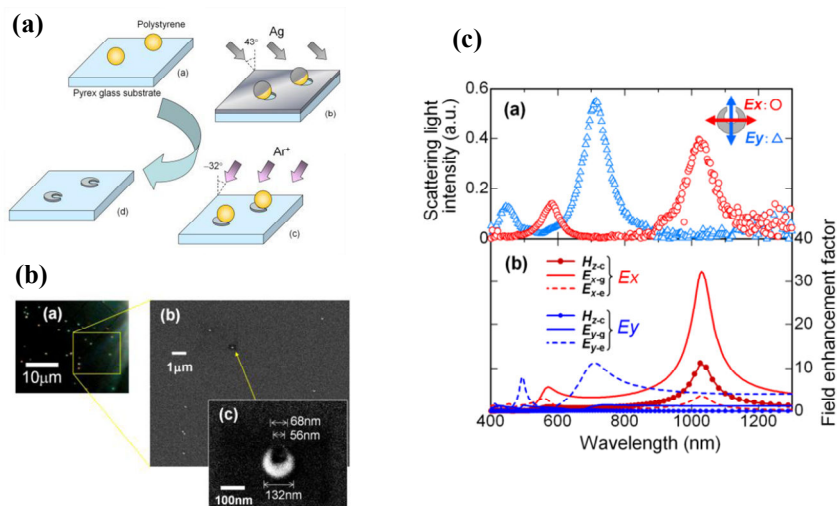


図14 (a) 微小球リソグラフィの原理、(b) 作製した分割リング共振器のSEM像、および、(c) 散乱スペクトル(上: 測定、下: シミュレーション)

を模擬することで、負の屈折率物質を作製できる可能性がある。図16(a)はその構造を模式的に示したもので、金属ナノロッドの太い部分が傘に相当し、細い部分が柄に相当する。この構造を作製するため、図16(b)に示されるように、陽極酸化による高規則性ポーラスアルミナをテンプレートとして、中に金属を充填することを試みた(中山 A02 公募)。ポイントは、均一な金属析出と100%の充填率の実現である。モニターしている電流の急激な増加が起こる直前が充填率100%であることが判明した。この方法を利用して、図16(a)の二重径金属ナノロッド配列を作製するのがこれからの計画である。

以上の他にも、磁場下で金属微粒子を動的にリング状に並べる手法(田中 A02 オ)など、いくつかの手法を試みている。今後、多様な作製手法についてはさらに検討を重ねつつ、特定の機能を得るための最適な作製法の選択を行っていく予定である。

## 2. 新奇な機能の実現

マイクロ波領域では、メタマテリアルの伝送線路理論において、右手系と左手系の $C$ と $L$ の値をうまくバランスさせると、 $\Gamma$ 点で線形なバンドの分散関係を実現でき、周波数を変化させることにより、右手系から左手系モードに連続的に変化させることができる(右手/左手複合メタマテリアル、真田 A01 ア)。この特性を利用すると、周波数を変えることによって、前方から後方へ連続的に放射角が広範囲に変化するアンテナを実現できる。一方、物性物理学においては、光や電子のバンド構造は $\Gamma$ 点では傾きゼロであるのが普通であるので、上記のような線形な関係はかなり異常に見える。この様な線形な分散関係は、 $\Gamma$ 点以外ではあるがグラフェンの電子バンドにおいて見られ、ディラックコーン(図17(a))と呼ばれて特異な物理的性質が発現することが知られている。

迫田(A02 オ)は一連の論文において、この特異な線形な分散関係が発現する理由について、フォトニック結晶のバンド構造計算の経験に基づき、群論的な考察と強束縛近似による計算を行った。まず、1次元系を調べ、図17(b)右図のような線形な分散関係が得られるためには、2つのモードが関係し、そのモードの対称性が $\Gamma$ 点で異なり(この図では $A_1$ 既約表現と $B_1$ 既約表現)かつ周波数が縮退すること、また、この2つのモードは $\Gamma$ 点からずれた有限の波数では、同じ既約表現に属する必要があること(図では $A$ 既約表現)を明らかにした。なお、図17(a)は、 $\Gamma$ 点で周波数が非縮退の場合の通常の分散関係である。さらに、2次元と3次元のメタマテリアルについて

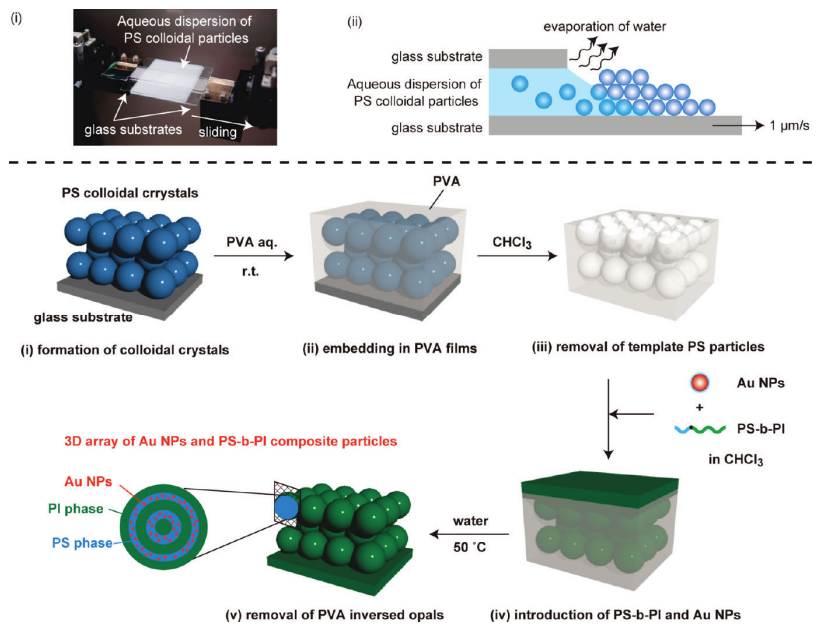


図15 超分子化学的手法による同芯円状金ナノ粒子配列の作製

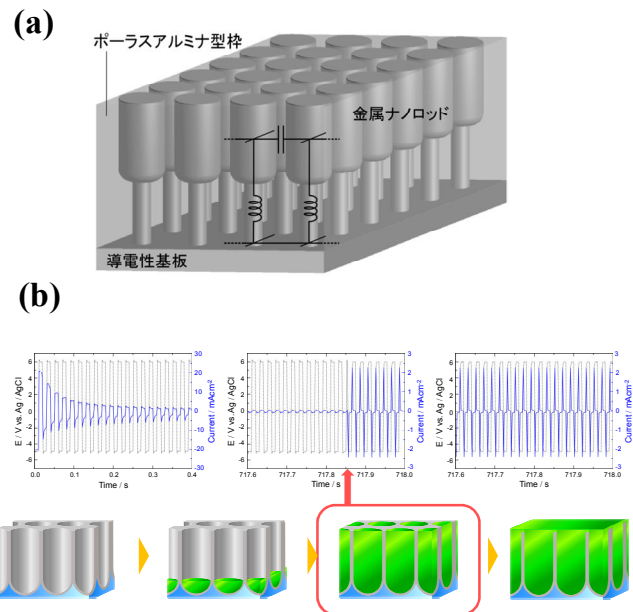


図16 (a) 二重径金属ナノロッド構造と (b) 電流モニターによる充填率制御

詳細に調べ、ディラックコーンが現れるための群論的な条件を明らかにした。また、2つのモードが共に2次元の既約表現の場合には、縮退した2枚のディラックコーンが現れることを初めて見出した。この研究は、物性物理学者が、新学術領域研究での交流により、マイクロ波工学における結果からインスパイアされて得られた成果である。

これまでに、石原ら (A02 エ) は、金属開口配列薄膜に斜入射で円偏光が入射した場合に右および左の円偏光に対して、互いに逆の横方向の起電力が生ずる興味深い現象を見出している。この起電力の原因を調べるために、西村ら (A02 エ) は自らが発展させてきた境界要素法に周期多重極法を組み込んだ高速シミュレーション法を適用し、石原らとの共同研究により、電場分布から説明が可能であることを明らかにした。なお、このシミュレーション手法は、フィッシュネット構造の最適化 (Figure Of Meritの向上) にも有用であることを示した。

時間反転や空間反転対称性は、先の非相反メタマテリアルのところでも述べたように、電磁波の伝搬に大きな影響を及ぼすことがある。そこで、空間反転対称性が破れたフォトニック結晶を組み込んだY字型導波路 (図18(a))において、レベル反発近傍

の状態を選択的に励起することにより、図18(a)のイメージと図18(b)に示されるように、生成される光渦の回転方向に依存した異方的伝搬特性が見られることを理論的に明らかにした (小野田 A02 エ)。今後の課題は、時間反転並びに空間反転対称性とメタマテリアル構造を統一的な観点から見直し、物性物理学的な視点も加えて、異方的な電磁波伝搬を理解することである。

### 3. デバイスへの応用

光領域では、特性の良いバルクなメタマテリアルの作製は、かなり先のことであろうと予想される。金属の損失が大きいのということがその原因のひとつであるが、表面メタマテリアルを反射型で利用する場合は、その損失はそれほど問題にはならず、実用に近いと考えられる。本研究では、トレンチ型 MIM (金属/絶縁体/金属) 3層構造のナノ共振器を基本構造として、これを2次元

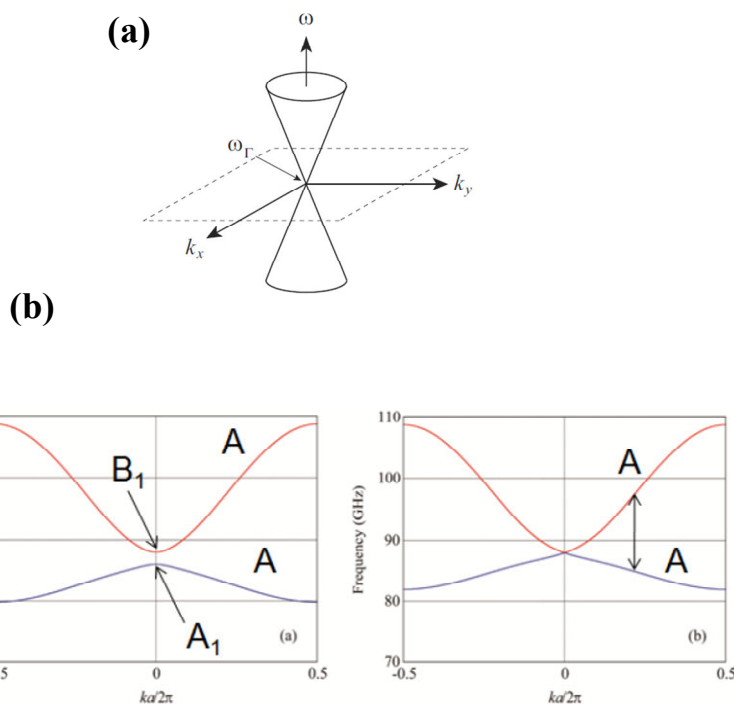


図17 (a) ディラックコーンと (b) メタマテリアルでディラックコーンが生成されるためのモードの群論的条件 (1次元の場合)

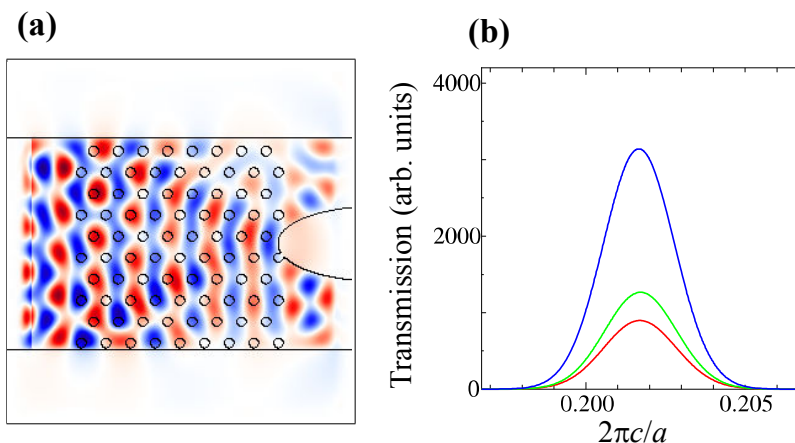


図18 (a) 空間反転対称性の破れたフォトニック結晶Y字型導波路における光の異方的伝搬のイメージと (b) 透過率スペクトルの異方性 (赤が上、青が下への分岐)



配列したメタ表面の創製技術を確認した (宮崎 A02 カ)。この構造を基本として、非線形光学効果の増強やインピーダンスマッチングによる完全吸収平面を実現していくのが目的である。図

19(a)は、石英基板表面を電子ビーム露光と反応性イオンエッチングで加工した後、金薄膜を蒸着することで得られた MIM 共振器配列である。エッチング条件の最適化により、絶縁体層の幅が70~120 nm、高さが約550 nmの高アスペクト比のMIM共振器が得られている。図19(b)は、RCWA法で計算した電場(左)と磁場(右)の分布であるが、両者が異なる空間分布をもつことがわかる。また、

図19(c)の上を示すように、試料の反射スペクトルには、このMIMのプラズモン共鳴によるディップが見られる。このような電場と磁場の強度が異なるような空間分布の制御は光領域ではかなりチャレンジングなことである。Er<sup>3+</sup>イオンは、1.53 μmに磁気双極子遷移の寄与が知られている発光バンドがある。このEr<sup>3+</sup>イオンを、共振器内の任意の位置に導入する技術を確認した。Er<sup>3+</sup>の位置を電場や磁場の腹の位置に導入した試料を作製し、発光スペクトルを測定したところ、図19(c)下のように位置依存性を示すことが確認され、特に、磁界強度の強い位置で磁気双極子遷移が増強されているのが確認された。スペクトル測定に加えて発光寿命測定も行い、パーセル効果による発光寿命の減少も確認できた。今後、このような磁気双極子遷移の制御に加えて、非線形光学効果の増強や無反射あるいは完全吸収表面などの、様々な機能を有するメタ表面を創製していく予定である。

光領域のデバイスとしては、この他にバビネの原理に基づく相補的積層構造の、薄くかつ高消光比の偏光子 (岩長 A02 カ)やMEMS技術に基づく可変光吸収導波路 (金森 A02 公募) などを実現している。また、光領域に限定されるわけではないが、メタマテリアルを利用した新しいクローキング (透明マント) 手法の提案も行った (落合 A02 公募)。

### A01とA02の連携研究

A01とA02の協力についてはこれまでにいくつか紹介してきたが、ここで、さらに2つの連携研究を紹介する。

まず、藻の一種スピルリナのらせん状器官を利用した人工光学活性メタマテリアルの研究である。彌田ら (A02 オ) は、スピルリナのらせん器官を大量に育成し銅を無電解メッキして、マイクロメートルオーダーの径の金属マイクロコイルを作製した (図20(a))。これを、シリコン樹脂中に分散させる技術も開発し、その試料を萩行ら (A01 イ) が偏光テラヘルツ時間領域分光法で評価した結果、図20(b)に示されるように、スピルリナコイルの密度が高いほど、右円偏光と左円偏光の透過率の差が大きく、強い光学活性が得られることを見出した。このバイオテンプレートを利用する手法は、従来のレーザー光による光硬化樹脂のプロトタイピングを利用する方法に比べて、圧倒的な高速大量生産が可能である。

次に、石原ら (A02 エ) と萩行ら (A01 イ) との連携研究について紹介する。光並びにテラル

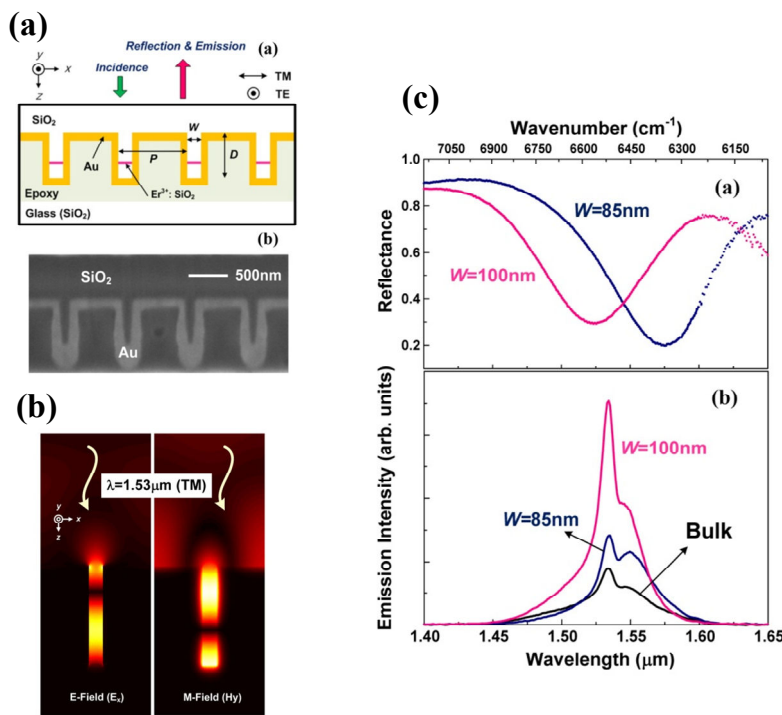


図 19 (a) トレンチ型MIM3層構造ナノ共振器、(b) シミュレーションによる電場と磁場分布、および、(c) 反射スペクトルとEr<sup>3+</sup>からの発光スペクトル

ツ波領域では、卍型の要素を2次元に並べたカイラル平面による光学活性が、高い関心を集めている。特に、五神らによる量子ドットと卍型配列を組み合わせた試料からの楕円偏光の発光は、人工的な楕円偏光度の制御の例として興味を持たれている。昨年の大震災では石原の所属する東北大学も大きなダメージを受け、しばらく研究がストップした。大阪大学の萩行研究室では、石原研究室のスタッフと大学院生を受け入れたが、石原らは研究テーマとして興味を持っていた光領域の卍型の研究をテラヘルツ波領域で行うことを提案した。萩行研では、テラヘルツ波放射用のフェムト秒レーザー励起光伝導アンテナの研究を行っていたので、卍型のアンテナを装荷した光伝導アンテナの研究を行うことになった。図21(a)は、超微細インクジェットプリンタで半絶縁性GaAs上に作製した卍型を含む様々な形状の光伝導アンテナであるが、そのテラヘルツ波放射の楕円率 (ellipticity) は、図21(b)に示されるように卍と逆卍では正負が逆になった。この偏光特性は、金属線を伝搬するテラヘルツ波パルスとその自由空間への放射をモデル化することで、簡単な説明が可能であることが判明した。このことを利用すると、放射の偏光をある程度自由に設計することが可能となる。

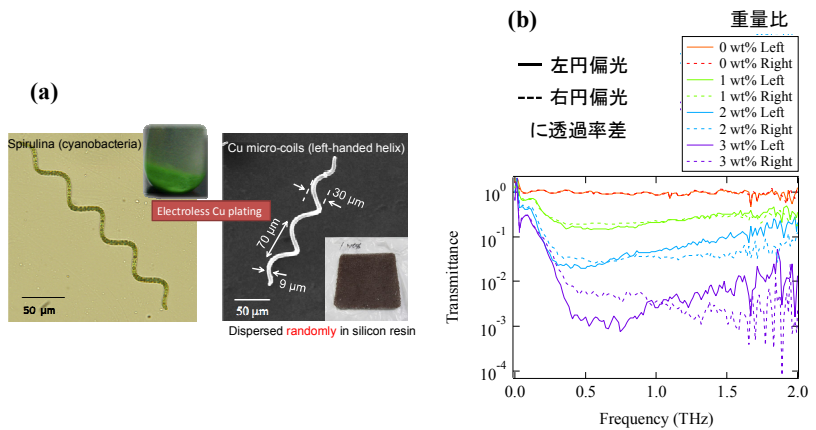


図20 (a) スピルリナのらせん器官と銅めっきをしたマイクロコイル、および、(b) それをシリコン樹脂中に分散した試料の右および左円偏光透過スペクトル

Figure 21(a) shows four micrographs of photonic antennas: (L) left-handed, (R) right-handed, (A) asymmetric, and (LR) left-right. Figure 21(b) shows two plots of Ellipticity versus Frequency (THz) from 0.0 to 2.5. The top plot shows Ellipticity for (A) (green circles), (L) (blue circles), and (R) (red circles). The bottom plot shows Ellipticity for (RL) (red circles) and (LR) (blue circles). The legend indicates: (A) (green circle), (L) (blue circle), (R) (red circle), FDTD (blue line), simulation (red line). The plots show that the ellipticity is positive for (L) and (R) and negative for (A), (LR), and (RL).

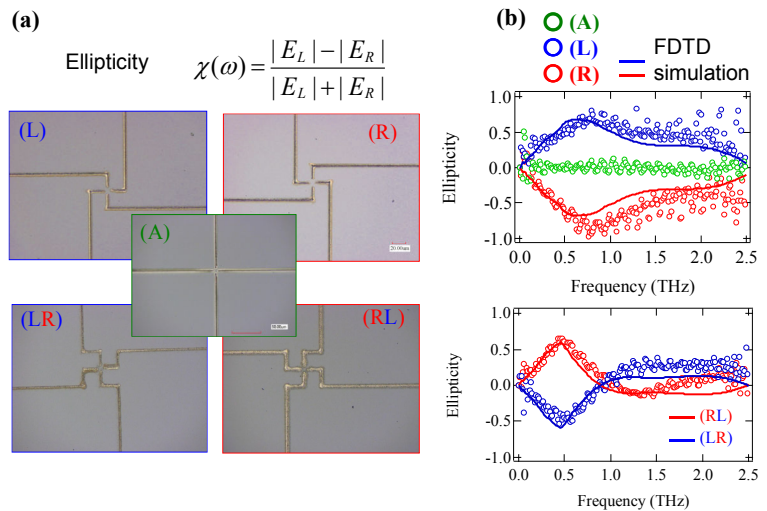


図21 (a) 卍型及び逆卍型の光伝導アンテナと (b) その放射テラヘルツ波スペクトルの楕円率

この偏光特性は、金属線を伝搬するテラヘルツ波パルスとその自由空間への放射をモデル化することで、簡単な説明が可能であることが判明した。このことを利用すると、放射の偏光をある程度自由に設計することが可能となる。

## 5. 研究成果の公表の状況

### (1) 主な論文など一覧について

領域全体の発表論文数 142件 (図書を含む) 以下のリストは一部省略

A01 計画研究 ア (真田)

- [1] \*真田篤志 (招待論文)「メタマテリアル技術の進展と応用」, 電気学会誌 **130**, 98-101 (2010)
- [2] \*真田篤志, (解説記事)「通信応用のためのメタマテリアル技術」, 電子情報通信学会誌**93**, 440-445 (2010)
- [3] \*真田篤志, (解説記事)「メタマテリアルとは? これで世の中はどうか変わるのか?」, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン **15**, 12-17 (2010)
- [4] \*Atsushi Sanada, “Backward wave propagation in an anisotropic metamaterial slab”, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference Proceedings, Vol.1, DC1-2, 2010
- [5] \*Tsunayuki Yamamoto, Atsushi Sanada, Hiroshi Kubo, “2D zeroth order resonator with non-planar metamaterial composed of metal rods”, Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2010, 1533-1536, 2010
- [6] \*Kenta Shimizu, Hiroshi Kubo, Atsushi Sanada, “Radiation characteristics of waveguide-type zeroth-order resonator”, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference Proceedings, Vol.1, 1529-1532, 2010
- [7] \*Hiroshi Kubo, Kazuhiro Nishibayashi, Atsushi Sanada, “New negative index material and experimental verification of exceeding diffraction limit”, 2010 European Microwave Conference Proceedings, Vol.1, 25-28, 2010
- [8] \*清水健太, 久保 洋, 「導波管型右手/左手系複合線路を用いた零次共振器とその放射特性」, 電子情報通信学会論文誌 **J93-C**, 590-596, 2010
- [9] \*Tetsuya Ueda, Gouki Haida, and Tatsuo Itoh, “Zeroth-order resonators with variable reactance loads at both ends”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **59**, 612-618, 2011
- [10] \*Shinya Ueno, Khin Myo Hitke, Yasushi Horii, “Ultra-wideband band pass filter with built-in notch filter configured by multi-layered CRLH unit cells”, Asia-Pacific Microwave Conference, 1138-1141, 2010
- [11] \*Takahiro Kawakami, Naohiro Inoue, Yasushi Horii, “A super-compact 0dB / 3dB forward coupler composed of multi-layered CRLH transmission lines with double left-handed shunt-inductors”, European Microwave Conference Proceedings, 1409-1412, 2010
- [12] \*Naohiro Inoue, Takahiro Kawakami, Yasushi Horii, “A super-compact dual-band Wilkinson power divider composed of multi-layered CRLH transmission lines, European Microwave Conference Proceedings”, 433-436, 2010
- [13] \*Yasushi Horii, (Invited) “Theoretical study on coupled multi-layer CRLH transmission lines with specifically designed left-handed shunt inductors”, International Conference on Communications, Circuits and Systems Proceedings, 631-635, 2010
- [14] \*Yujiro Kushiyama and Toru Uno, “Novel negative permittivity structure and its application to excitation of surface plasmon in microwave frequency range, IEICE Transactions on Communications **E93-B**, 2629-2635 (2010)
- [15] \*Amin G. Hanif, Toru Uno, “FDTD and FDTD methods for band diagram analysis of 2-dimensional periodic structure”, IEICE Transactions on Communications **B93-B**, 2670-2672 (2010)
- [16] \*Yasushi Horii, (Invited) “Recent progress on multi-layered CRLH transmission lines and potential applications”, 電子情報通信学会, 2010.10.21, Nang Yang University (シンガポール)
- [17] \*Yasushi Horii, “Dielectric-resonator-like response of a metamaterial particle composed of a multi-layered CRLH transmission line”, Progress In Electromagnetics Research Symposium, 2011.3.20, Marrakesh (Morocco)
- [18] \*Shinya Ueno, Naohiro Inoue, Takuya Kaneko, and Yasushi Horii, “Design of super-compact

- multi-layered CRLH transmission lines using the latest low-temperature co-fired ceramics (LTCC) technology”, Progress In Electromagnetics Research Symposium, 2011.3.20, Marrakesh (Morocco)
- [19] \*T. Konishi, A. Sanada, H. Kubo, Y. Hori, “A thin card-sized on-metal UHF-RFID tag using a radiative mushroom structure with an IC chip mounted on a small magnetic loop”, *IEICE Electronics Express* **9**, 276-282 (2012)
- [20] \*Y. Horii, S. Gupta, B. Nikfal, and C. Caloz, “Multilayer broadside-coupled dispersive delay structures for analog signal processing”, *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* **22**, 1-3 (2012)
- [21] \*Y. Horii, N. Inoue, T. Kawakami, and T. Kaneko, “Super-compact LTCC-based multi-layered CRLH transmission lines for UWB applications”, 2011 European Microwave Conference Proceedings, EuMC30-5, pp.511-514, 2011
- [22] \*T. Kawakami and Y. Horii, “A compact composite right/left-handed (CRLH) leaky wave antenna composed of 2 x 2 coupled-mushrooms for broadband wireless communications”, 2011 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings, WE2P-19, pp.674-677, 2011
- [23] \*Z. Hu and Y. Horii, “Electromagnetic response of a CRLH particle composed of a multi-layered CRLH transmission line with a floating ground”, 2011 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings, WE5P-33, pp.1094-1097, 2011
- [24] \*Y. Horii, K. M. Hitke, N. Tani, and Z. Hu, “Wideband impedance transformer composed of LTCC-based multi-layered CRLH architecture”, 2011 European Microwave Conference Proceedings, EuMC30-4, pp.507-510, 2011
- [25] \*T. Ueda, G. Haida, and T. Itoh, “Zeroth-order resonators with variable reactance loads at both ends”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **59**, 612-618, 2011, 10.1109/TMTT.2010.2103087
- [26] \*H. Kishimoto, T. Ueda, and Y. Kado, “Experimental demonstration of nonreciprocal phase-shift composite right/left handed transmission lines using a ferrite-rod-embedded substrate”, *IEEE Transactions on Magnetics* **47**, 3724-3727 (2011)
- [27] \*T. Ueda and T. Itoh, “Progress on CRLH metamaterials based on dielectric resonators”, *Applied Physics A, Material Science & Processing* **103**, 529-535 (2011)
- [28] \*T. Ueda and T. Itoh, “Mu-negative, double-negative, and composite right/left handed metamaterials based on dielectric resonators”, *IEICE Electronics Express (ELEX)* **9**, 65-80 (2012)
- [29] \*A.G.Hanif, Toru Uno, and Takuji Arima, “FDFD and FDTD analysis of 2-dimensional lossy photonic crystals”, *IEICE Electronics Express* **8**, 695-698 (2011)
- [30] \*井出守, 宇野亨, 櫛山裕次郎, 有馬卓司, 「誘電体スラブ上周期ストリップ導体による平面電磁波散乱の高速モーメント法解析」, *電子情報通信学会論文誌B* **J94-B**, 1086-1093 (2011)
- [31] \*A.G.Hanif, Toru Uno, and Takuji Arima, “Finite-difference frequency-domain algorithm for band diagram calculation of 2-dimensional crystals composed of debye type dispersive materials”, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **11**, 41-44 (2012)
- [32] T. Yamamoto \*, A. Sanada, and H. Kubo, “Measurements of a 3-D negative refractive index slab lens composed of periodic wired metallic spheres”, 2012 European Microwave Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 353-356, 2012
- [33] \*S. Nagai, A. Sanada, T. Yamamoto, and H. Kubo, “Negative refractive index characteristics of a uniaxial anisotropic  $\mu$ -negative slab”, 5th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Vol. 1, pp. 353-356, 2011
- [34] \*T. Yamamoto, H. Kubo, M. Watanabe, and, A. Sanada, “Design of a composite right/left-handed slab-type material composed of multilayer metallic patterns”, 5th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Vol. 1, pp. 958-960, 2011
- [35] \*T. Ueda, G. Haida, Y. Kado, and T. Itoh, “Polarization-controllable zeroth-order-resonator antennas with reactance loads at both ends”, 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IMS

2011), TU2F-2, 1-4, 2011, 10.1109/MWSYM.2011.5972663

[36] \*Y. Sato, T. Ueda, Y. Kado, and T. Itoh, "Design of isotropic 3-D multilayered CRLH metamaterial structures using conductive mesh plates and dielectric resonators", Proceedings of the 2011 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2011), WE1C-01, 526-529, 2011

[37] \*T. Ueda, S. Yamamoto, and Y. Kado, "Beam-scanning traveling-wave-resonator antenna based on nonreciprocal phase-shift CRLH transmission lines", 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Proceedings, TU-PM.3.9, 1058-1061, 2011, 10.1109/APS.2011.5996462

[38] \*T. Ueda, "Nonreciprocal metamaterials and their applications to antennas", Proceedings of the 2011 International Symposium on Antennas and Propagation, ThB1-4, 1-4, 2011

[39] \*H. Kishimoto, T. Ueda, and Y. Kado, "Experimental demonstration of nonreciprocal phase-shift composite right/left handed transmission lines with ferrite rods", 2011 IEEE International Magnetics Conference Digest, FD-08, 1-2, 2011

[40] \*T. Ueda and H. Kishimoto, "Tunable traveling-wave resonators using nonreciprocal phase-shift composite right/left handed transmission lines", 2011 IEEE International Magnetics Conference Digest, FD-06, 1-2, 2011

[41] \*T. Fukushima, H. Kubo, A. Sanada, and T. Yamamoto, "Negative index material composed of cylinders with a metal pattern, Proceedings of the 2011 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2011), WE1C-02, 530-533, 2011

#### A01 計画研究 イ (萩行)

[1] \*Fumiaki Miyamaru, Mototsugu Kamijyo, Keisuke Takano, Masanori Hangyo, Hiroshi Miyazaki, and Mitsuo Wada Takeda, "Characteristics and generation process of surface waves excited on a perfect conductor surface", Optics Express **18**, 17576-17583 (2010)

[2] \*Koichi Akiyama, Keisuke Takano, Yuji Abe, Yasunori Tokuda, and Masanori Hangyo, "Optical transmission anomalies in a double-layered metallic slit array", Optics Express **18**, 17876-17882 (2010)

[3] \*Xiao Xiao, Wu Jinbo, Yuki Sasagawa, Fumiaki Miyamaru, Mengying Zhang, Mitsuo W. Takeda, Chunyin Qiu, Weijia Wen, and Ping Sheng, "Resonant terahertz transmissions through metal hole array on silicon substrate", Optics Express **18**, 18558 (2010)

[4] \*Sang Hyun Lee, Takenari Goto, Hiroshi Miyazaki, Jiho Chang, and Takafumi Yao, "Optical resonant cavity in a nanotaper", Nano Letters **10**, 2038-2042 (2010)

[5] \*Naoki Matsumoto, Tadasu Hosokura, Takeshi Nagashima, and Masanori Hangyo, "Measurement of the dielectric constant of thin films by terahertz time-domain spectroscopic ellipsometry", Optics Letters **36**, 265-267 (2011)

[6] \*D. Li, M. Hangyo, Z. Yang, M. R. Asakawa, S. Miyamoto, Y. Tsunawaki, K. Takano, and K. Imasaki, "Smith-Purcell radiation from a grating of negative-index material", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **637**, 135-137 (2011)

[7] \*D. Li, Z. Yang, Y. Tsunawaki, M. R. Asakawa, M. Hangyo, S. Miyamoto, and K. Imasaki, "Improve growth rate of Smith-Purcell free-electron lser by Bragg reflector", Applied Physics Letters **98**, 211503-1-3 (2011)

[8] Kenichi Yatsugi, Naoki Matsumoto, \*Takeshi Nagashima, and Masanori Hangyo, "Transport properties of free carriers in semiconductors studied by terahertz time-domain magneto-optical ellipsometry", Applied Physics Letters **98**, 212108-1-3 (2011)

[9] \*Xiao Xiao, Wu Jinbo, Fumiaki Miyamaru, Mengying Zhang, Shunbo Li, Mitsuo W. Takeda, Weijia Wen, and Ping Sheng, "Fano effect of metamaterial resonance in terahertz extraordinary transmission", Applied Physics Letters **98**, 011911 (2011)

[10] Keisuke Takano, Hiroshi Yokoyama, Akira Ichii, Isao Iwamoto, and Masanori Hangyo, "Wire-grid polarizer sheet in the terahertz region fabricated by nanoimprint technology", Optics Letters **36**,

2665-2667 (2011)

- [11] \*K. Tanaka, H. Hirori, and M. Nagai, “THz nonlinear spectroscopy of solids”, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology **1**, 301-312 (2011)
- [12] Y. Minowa\*, M. Nagai, H. Tao, K. Fan, A. C. Strikwerda, X. Zhang, R. D. Averitt, and K. Tanaka, “Extremely thin metamaterial as slab waveguide at terahertz frequencies”, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology **1**, 441-449 (2011)
- [13] \*萩行正憲, 高野恵介 (解説記事), 「テラヘルツメタマテリアル」, マテリアルインテグレーション
- [14] \*Keisuke Takano, Yui Chiyoda, Tsubasa Nishida, Fumiaki Miyamaru, Taku Kawabata, Hirofumi Sasaki, Mitsuo W. Takeda, and Masanori Hangyo, Applied Physics Letters **99**, 161114-1-3 (2011)
- [15] \*萩行正憲, 高野恵介 (解説記事), 「テラヘルツ波メタマテリアル」, OPTRONICS. 63-67 (2011) No. 12
- [16] Kohei Kouzuki, \*Takeshi Nagashima, and Masanori Hangyo, “Measurement of electron paramagnetic resonance using terahertz time-domain spectroscopy”, Optics Express **19**, 24950-24956 (2011)
- [17] 高野恵介, \*萩行正憲 (図書), NIKKO Green MOOK 「プリテッドエレクトロニクスのすべて」第5章プリテッドエレクトロニクスの最先端開発「テラヘルツ領域における光学素子の形成」, (日本工業出版, 2012)
- [18] \*D. Li, M. Hangyo, Y. Tsunawaki, Z. Yang, Y. Wei, S. Miyamoto, M. R. Asakawa, and K. Imasaki, “Super-radiant Smith-Purcell radiation from periodic line charges”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **674**, 20-23 (2012)
- [19] \*Masahiko Tani, Kohji Yamamoto, Elmer S. Estacio, Christopher T. Que, Hidekazu Nakajima, Masakazu Hibi, Fumiaki Miyamaru, Seizi Nishizawa, and Masanori Hangyo, “Photoconductive emission and detection of terahertz pulsed radiation using semiconductors and semiconductor devices”, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves **33**, 393-404 (2012)
- [20] \*Yasunori Tokuda, Hidemitsu Takaiwa, Koichiro Sakaguchi, Yuya Yakiyama, Keisuke Takano, Koichi Akiyama, Takehiro Fukushima, and Masanori Hangyo, “Optical phased array functions in double-layered metallic plate systems with artificially modulated slit arrays”, Applied Physics Express **5**, 042502-1-3 (2012)
- [21] \*D. Li, M. Hangyo, Y. Tsunawaki, Z. Yang, Y. Wei, S. Miyamoto, M. R. Asakawa, and K. Imasaki (book), “Theoretical analysis on Smith-Purcell free-electron laser” in Free Electron Lasers, InTech, 2012
- [22] \*萩行正憲 (解説論文), 「テラヘルツ波技術の歩みと展望」, 応用物理 **81**, 271-283 (2012)
- [23] \*D. Li, M. Hangyo, Y. Tsunawaki, Z. Yang, Y. Wei, S. Miyamoto, M. R. Asakawa, and K. Imasaki, “Growth rate and start current in Smith-Purcell free-electron lasers”, Applied Physics Letters **100**, 191101-1-3 (2012)
- [24] \*Fumiaki Miyamaru, Mototsugu Kamijyo, Naoki Hanaoka, and Mitsuo W. Takeda, “Controlling extraordinary transmission characteristics of metal hole arrays with spoof surface plasmons”, Applied Physics Letters **100**, 081112 (2012)
- [25] \*高野恵介, 宮丸文章, 萩行正憲 (図書), 「第12章 テラヘルツ領域のメタマテリアル」, 石原照也他監修 「メタマテリアル II」, シーエムシー出版, 2012
- [26] \*高野恵介, 宮丸文章, 萩行正憲 (解説記事). 「メタマテリアルおよびメタアトムのテラヘルツデバイスへの応用」, レーザー研究 **40**, 508-512 (2012)
- [27] \*M. Nagai, E. Matsubara, and M. Ashida, “High-efficiency terahertz pulse generation via optical rectification by suppressing stimulated Raman scattering process”, Optics Express **20**, 6509 (2012)
- [28] \*Fumiaki Miyamaru, Shiro Kuboda, and Mitsuo W. Takeda, “Terahertz response of split-ring resonators with fractal structures”, Applied Physics Express, to be published.

A01 計画研究 ウ (北野)

- [1] \*Y. Tamayama, T. Nakanishi, Y. Wakasa, T. Kanazawa, K. Sugiyama, and M. Kitano, “Electromagnetic response of a metamaterial with field-gradient-induced transparency,” *Physical Review B* **82**, 1615130-1-6 (2010)
- [2] \*O. Sakai, T. Shimomura, and K. Tachibana, “Negative refractive index designed in a periodic composite of lossy microplasmas and microresonators”, *Physics of Plasmas* **17**, 123504-1-9 (2010)
- [3] T. Kanazawa, \*Y. Tamayama, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Enhancement of second harmonic generation in a doubly resonant metamaterial”, *Applied Physics Letters* **99**, 024101-1-3 (2011)
- [4] \*Y. Aoki, H. Deguchi, and M. Tsuji, “Reflectarray with arbitrarily-shaped conductive elements optimized by genetic algorithm”, *Conference Publications of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp. 960–963, 2011
- [5] \*M. Nakatsukasa, H. Deguchi, M. Tsuji, and S. Ikari, “A design method of composite right/left handed transmission lines by Genetic algorithm”, *Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2011.
- [6] \*T. Toyoda, H. Deguchi, M. Tsuji, and T. Nishimura, “Reflectarray elements based on two-resonance behavior for dual-polarization use”, *Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2011.
- [7] \*O. Sakai, “Transition between positive and negative permittivity in field-dependent metamaterial”, *Journal of Applied Physics* **109**, 084914-1-6 (2011)
- [8] \*Y. Tamayama, T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano(分著), *Wave Propagation*, InTech, pp. 415-432, 2011
- [9] \*北野正雄、中西俊博、「フォトニックナノ構造の最近の進展」、シーエムシー出版、268-276頁、2011年
- [10] \*Y. Tamayama, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Variable group delay in a metamaterial with field-gradient-induced transparency”, *Physical Review B* **85**, 073102-1-4 (2012)
- [11] \*M. Kitano, Y. Tamayama, and T. Nakanishi, “Coupled-resonator-based metamaterials”, *IEICE Electronics Express* **9**, 51-64 (2012)
- [12] \*T. Nakanishi, Y. Tamayama, and M. Kitano, “Efficient second harmonic generation in a metamaterial with two resonant modes coupled through two varactor diodes”, *Applied Physics Letters* **84**, 052114-1-5 (2012)
- [13] \*Y. Nakata, T. Okada, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Observation of flat band for terahertz spoof plasmon in a metallic kagome lattice”, *Physical Review B* **85**, 205128-1-5 (2012)
- [14] \*O. Sakai and K. Tachibana, “Plasmas as metamaterials: a review”, *Plasma Sources Science and Technology* **21**, 013001-1-18 (2012).
- [15] \*M. Kitano(分著), *Trends in Electromagnetism - From Fundamentals to Applications*, Intech, pp. 21-44, 2012.

A01 公募研究

- [1] \*高原淳一 (解説論文), 「プラズモニック導波路」, *応用物理* **80**, 772-778 (2011)
- [2] \*K. Kan, J. Yang, A. Ogata, T. Kondoh, K. Norizawa, and Y. Yoshida, “Multimode terahertz-wave generation using coherent Cherenkov radiation”, *Applied Physics Letters* **99**, 231503 (2011)
- [3] K. Kan, J. Yang, K. Norizawa, T. Kondoh, Y. Yoshida, and \*A. Ogata, "Proposal for generation of high-intensity monochromatic cherenkov radiation in THz range by femtosecond electron bunches impurity-doped semiconductor tube", *Radiat. Phys. Chem.* **80**, 1323-1326 (2011)
- [4] \*高原淳一 (図書分担), 第7章2.5節 プラズモニクス, *光エレクトロニクスとその応用*(オーム社、2011), pp.413-422.
- [5] \*K. Kan, T. Kondoh, J. Yang, A. Ogata, K. Norizawa, and Y. Yoshida, “Development of

double-decker pulse radiolysis”, Rev. Sci. Instrum., Accepted.

[6] \*高原淳一, 宮田将司, “金属ナノスラブ導波路における表面プラズモンの伝送と集束”, 表面科学 **33**, 209-215 (2012)

[7] M. Miyata and \*J. Takahara, “Excitation control of long-range surface plasmons by two incident beams”, Optics Express **20**, 9493-9500 (2012)

[8] M. Miyata and \*J. Takahara, "Field enhancement by longitudinal compression of plasmonic slow light", Journal of Applied Physics **111**, 053102-1-4 (2012)

#### A02 計画研究 エ (石原)

[1] \*Yoshiki Kohmura, Kei Sawada, and Tetsuya Ishikawa, “Berry-phase translation of X rays by a deformed crystal”, Physical Review Letters **104**, 244801-1-4 (2010)

[2] \*Kenji Tamasaku, Kei Sawada, Eiji Nishibori, and Tetsuya Ishikawa, “Visualizing the local optical response to extreme-ultraviolet radiation with a resolution of  $\lambda/380$ ”, Nature Physics **7**, 705-707 (2011)

[3] A. S. Vioktalamo, R. Watanabe, and \*T. Ishihara, "Permeability enhancement of stratified metal dielectric metamaterial in optical regime", Photonics and Nanostructures **10**, 325-328 (2011)

[4] Hiroyuki Kurosawa and \*Teruya Ishihara, "Surface plasmon drag effect in a dielectrically modulated metallic thin film," Optics Express **20**, 1561-1574 (2012)

[5] W. Wang and \*N. Nishimura, “Calculation of shape derivatives with periodic fast multipole method with application to shape optimization of metamaterials”, Progress in Electromagnetics Research **127**, 49—64 (2012)

[6] K. Niino and \*N. Nishimura, “Preconditioning based on Calderon's formulae for periodic fast multipole methods for Helmholtz' equation”, Journal of Computational Physics **231**, 66-81 (2012)

[7] \*D. Maryenko, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Onoda, H. Aoki, and M. Kawasaki, “Temperature-dependent magnetotransport around  $\nu=1/2$  in ZnO heterostructures” Physical Review Letters **108**, 186803-1-5 (2012)

[8] Hiroyuki Kurosawa, Naoki Ikeda, Daiju Tsuya, Masayuki Ochiai, and Yoshimasa Sugimoto and \*Teruya Ishihara, “Optical rectification effect due to surface plasmon polaritons at normal incidence in non-diffraction regime”, Optics Letters accepted

#### A02 計画研究 オ (田中)

[1] \*Takahito Ohshiro, Tamotsu Zako, Ryoko Watanabe-Tamaki, Takuo Tanaka, and Mizuo Maeda, “A facile method towards cyclic assembly of gold nanoparticles using DNA template alone”, Chemical Communications **46**, 6132-6134 (2010)

[2] \*Shigeru Watanabe, Shin Nakano, Chie Imai, Inamur R. Laskar, Tomonori Komura, Shingo Hadano, and Tomokazu Iyoda, “A simple and convenient method to fabricate hexagonally ordered gold nanoparticle arrays using diblock copolymer micelle template”, Chemistry Letters **39**, 902-904 (2010).

[3] \*Yoshiaki Nakamura, Akiyuki Murayama, Ryoko Watanabe, Tomokazu Iyoda, and Masakazu Ichikawa, “Self-organized formation and self-repair of a two-dimensional nanoarray of Ge quantum dots epitaxially grown on ultrathin SiO<sub>2</sub>-covered Si substrates”, Nanotechnology **21**, 095305/095301-095305/095305 (2010).

[4] \*Jing-ze Li, Guo-guang Chen, Di Mei, Wei Zou, Jian-wen Li, Motonori Komura and Tomokazu Iyoda, "Applications of block copolymer films in the field of electrochemical energy systems”, Dianhuaxue **16**, 11-15 (2010)

[5] \*Jing Ze Li, Ying Wang, Zhi Hong Wang, Di Mei, Wei Zou, Ai Min Chang, Qi Wang, Motonori Komura, Kaori Ito, and \*Tomokazu Iyoda, "Phase-selective staining of metal salt for scanning electron microscopy imaging of block copolymer film”, Ultramicroscopy **110**, 1338-1342 (2010)



- [6] \*Kentarō Furusawa, Norihiko Hayazawa, Takayuki Okamoto, Takuo Tanaka, and Satoshi Kawata, “Generation of broadband longitudinal fields for applications to ultrafast tip-enhanced near-field microscopy”, *Optics Express* **19**, 25328-25336 (2011)
- [7] \*Takuo Tanaka, “Two-photon recording and plasmon-enhanced read-out of three-dimensional optical disk with ten recording layers”, *Japanese Journal of Applied Physics* **50**, 902 (2011)
- [8] Wakana Kubo and \*Shigenori Fujikawa "Au double nanopillars with nanogap for plasmonic sensor", *Nano Letters* **11**, 8-15 (2011)
- [9] Wakana Kubo, Harumi Hayakawa, Kentaro Miyoshi, \*Shigenori Fujikawa, “Size-controlled simple fabrication of free-standing, ultralong metal nanobelt array”, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **11**, 131-137, (2011).
- [10] Wei Zou, Ying Wang, Zhihong Wang, Aijun Zhou, \*Jingze Li, Aimin Chang, Qi Wang, Motonori Komura, Kaori Ito and \*Tomokazu Iyoda, "Solvent induced formation of an ordered nanorod array of gold/polymer composite by block copolymer film templating”, *Nanotechnology* **22**, 335301/335301-335301/335306 (2011)
- [11] Yongbin Zhao, Aihua Chen, and \*Tomokazu Iyoda, “Nanostructure dependent surface energy of silica nanorod arrays through block copolymer templating processes”, *MRS Online Proceedings* **1312**, No pp. given (2011)
- [12] Shuai Zhang, Ryohei Sakai, Toshiyuki Abe, Tomokazu Iyoda, Takayoshi Norimatsu and \*Keiji Nagai, “Photoelectrochemical and photocatalytic properties of biphasic organic p- and n-type semiconductor nanoparticles fabricated by a reprecipitation process”, *ACS Applied Material Interfaces* **3**, 1902-1909 (2011)
- [13] Shuai Zhang, Toshiyuki Abe, Tomokazu Iyoda, Takayoshi Norimatsu, and \*Keiji Nagai, “Organic semiconductor nanoparticles with heterojunctions composed of fullerene C60 and zinc phthalocyanine and their application to visible-light-responsive photocatalysts”, *Transaction of Material Research Society Japan* **36**, 177-181 (2011)
- [14] \*Takashi Yamamoto, Taro Kimura, Motonori Komura, \*Yukimitsu Suzuki, \*Tomokazu Iyoda, Sadayuki Asaoka, and Haruyuki Nakanishi, “Block copolymer permeable membrane with visualized high-density straight channels of poly(ethylene oxide)”, *Advanced Functional Materials* **21**, 918-926 (2011)
- [15] \*Keiji Nagai, Kohei Miyamoto, Tomokazu Iyoda, Cao Pan, and Zhongze Gu, “Monolithic and low-Ddensity (<math><50 \text{ mg/cm}^3</math>) metal oxides fabricated using electrospinning: Vanadium oxide and copper oxide examples”, *Fusion Science and Technology* **59**, 216-220 (2011)
- [16] Hideaki Komiyama, \*Tomokazu Iyoda, and Kaori Kamata, “Polypyrrole nanowire array with high aspect ratio fabricated by block-copolymer-templated electropolymerization”, *MRS Online Proceedings* **1312**, No pp. given (2011)
- [17] \*Kaori Kamata, Soichiro Suzuki, Masayuki Ohtsuka, Masaru Nakagawa, Tomokazu Iyoda, and Atsushi Yamada, “Fabrication of left-handed metal microcoil from spiral vessel of vascular plant”, *Advanced Materials* **23**, 5509-5513 (2011)
- [18] \*Sadayuki Asaoka, Takayuki Uekusa, Hitomi Tokimori, Motonori Komura, \*Tomokazu Iyoda, Takeshi Yamada, and Hirohisa Yoshida, “Normally oriented cylindrical nanostructures in amphiphilic PEO-LC diblock copolymers films”, *Macromolecules* **44**, 7645-7658 (2011)
- [19] Kanna Aoki, Kentaro Furusawa, and \*Takuo Tanaka, “Magnetic assembly of gold core-shell necklace resonators”, *Applied Physics Letters* **100**, 181106 (2012)
- [20] Atsushi Ishikawa and \*Takuo Tanaka, "Two-photon fabrication of three-dimensional metallic nanostructures for plasmonic metamaterials," *Journal of Laser Micro / Nanoengineering* **7**, 11-15 (2012)

- [1] \*K. Sakoda and H-F. Zhou, “Role of structural electromagnetic resonances in a steerable left-handed antenna”, *Optics Express* **18**, 27371- 27386 (2010)
- [2] \*M. Iwanaga, “A new class of plasmonic crystals: the eigen modes, field enhancement, and applications”, *Proc. SPIE*, Vol. 7946, p.111-p.118, 2011
- [3] \*K. Sakoda and H-F. Zhou, “Analytical study of two-dimensional degenerate metamaterial antennas”, *Optics Express* **19**, 13899-13921 (2011)
- [4] \*M. Iwanaga, “In-plane plasmonic modes of negative group velocity in perforated waveguides”, *Optics Letters* **36**, 2504- 2506 (2011)
- [5] \*K. Sakoda, “Dirac cone in two- and three-dimensional metamaterials”, *Optics Express* **20**, 3898-3917 (2012)
- [6] \*K. Sakoda, “Double Dirac cones in triangular-lattice metamaterials”, *Optics Express* **20**, 9925-9939 (2012)
- [7] \*T. Matsui, A. Miura, T. Nomura, H. Fujikawa, K. Sato, N. Ikeda, D. Tsuya, M. Ochiai, Y. Sugimoto, H. T. Miyazaki, M. Ozaki, M. Hangyo, and K. Asakawa, “Phase measurement interferometric microscopy of stacked fishnet metamaterials”, *Proc. SPIE*, Vol. 8269, p.2P1-p.2P6, 2012
- [8] T. Hattori, A. Kubo, K. Oguri, H. Nakano, and \*H. T. Miyazaki, “Femtosecond laser-excited two-photon fluorescence microscopy of surface plasmon polariton”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 1-4 (2012)

#### A02 公募研究

- [1] \*H. Yabu, T. Jinno, K. Koike, T. Higuchi, and M. Shimomura, “Three-dimensional assembly of gold nanoparticles in spherically confined microphase-separation structures of block-copolymers”, *Macromolecules* **44**, 5868–5873 (2011)
- [2] \*H. Yabu, T. Nakanishi, Y. Hirai, and M. Shimomura, “Black thin layers generate strong structural colors; A biomimetic approach for creating one-dimensional (1D) photonic crystals”, *Journal of Materials Chemistry* **21**, 15154-15156 (2011)
- [3] \*H. Yabu, K. Koike, T. Higuchi, and M. Shimomura, “Nanoparticle Arrangements in block-copolymer particles having microphase separated structures”, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* **49**, 1717-1722 (2011)
- [4] K. Okamura, R. Inoue, T. Sebille, K. Tomono, and \*M. Nakayama, “An approach to optimize the composition of supercapacitor electrodes consisting of manganese-molybdenum mixed oxide and carbon Nanotubes”, *Journal of the Electrochemical Society* **158**, A711-A717 (2011)
- [5] C. Iida, M. Sato, \*M. Nakayama, and A. Sanada, “Electrodeposition of Cu<sub>2</sub>O nanopyramids using an anodic oxide template”, *International Journal of Electrochemical Science* **6**, 4730-4736 (2011)
- [6] R. Inoue, Y. Nakashima, K. Tomono, and \*M. Nakayama, “Electrically rearranged birnessite-type MnO<sub>2</sub> by repetitive potential steps and its pseudocapacitive properties”, *Journal of the Electrochemical Society* **159**, A445–A451 (2012)
- [7] R. Inoue and \*M. Nakayama, “Fabrication of a hybrid capacitor composed of vertically-aligned multilayered manganese oxide film”, *ECS Transactions* **41**, 83 (2012)
- [8] \*M. Nakayama, K. Okamura, L. Athouël, O. Crosnier, and T. Brousse, “Fabrication of a transparent supercapacitor electrode consisting of Mn-Mo oxide/CNT nanocomposite”, *ECS Transactions* **41**, 53 (2012)
- [9] \*M. Nakayama, M. Nishiyama, M. Shamoto, T. Tanimoto, K. Tomono, and R. Inoue, “Cathodic synthesis of birnessite-type layered manganese oxides for electrocapacitive catalysis”, *Journal of the Electrochemical Society* (2012), in press
- [10] \* H. Ishihara, A. Nobuhiro, M. Nakatani, and Y. Mizumoto, “Anomalous optical response of metal–molecule coupled system”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry* **211**,

148-153 (2011)

[11] \* G. Tei, M. Nakatani, and H. Ishihara, “The relation of efficiency of excitation energy transfer and ring size of ring-shaped light harvesting complex”, International Journal of Hydrogen Energy **37**, 8872-8877 (2012)

## (2) ホームページについて

ホームページ (<http://www.metamate.net/>) には、領域の紹介 (日、英)、講演会などの研究活動、メンバーによる研究紹介を含むニューズレター (現在、No. 14まで発行) などのコンテンツが含まれている。アクセス数は、平時で40件/日程度であるが、公開講演会などの案内時には、これをはるかに超える。

## (3) 公開発表について

### 国内外でのシンポジウムやセミナーの開催状況

「キックオフ研究会」、平成22年9月2日、大阪大学、約160人

「第1回電磁メタマテリアル講演会」、平成23年3月11日、東京大学、約320人

「第2回電磁メタマテリアル講演会」、平成24年3月9日、東京大学、約310人

応用物理学会シンポジウム「電磁メタマテリアルの現状と将来」(震災で中止、但し予稿集が出たのでシンポジウムとしては成立)

応用物理学会シンポジウム「電磁メタマテリアルの最近の進展と将来展望」、平成24年3月15日、早稲田大学、約100人

第1回日韓メタマテリアルフォーラム、平成23年7月7-9日、韓国梨花女子大、126名

第2回日韓メタマテリアルフォーラム、平成6月28-30日、つくば国際会議場、104名

### 国内外の会議等での招待講演

内外の会議等での招待講演は、小規模のものも含めると、計169件に上っている。以下で主なものをいくつか挙げる。

[1] Atsushi Sanada, “Transmission lines in metamaterial”, The 4th Yamada Symposium on Advanced Photons and Science Evolution 2010, Osaka, Japan, June 15, 2010

[2] Atsushi Sanada, “Introduction to electromagnetic metamaterials”, Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) and Alexander von Humboldt-Foundation Japanese-German Frontiers of Science Symposium (JGFoS), Potsdam, Germany, November 2010

[3] Atsushi Sanada, “Composite right/left-handed waveguide and its application to V-band beam steering leaky-wave antennas”, 2011 International Symposium on Antennas and Propagation, Oct. 26, 2011, Jeju, Korea

[4] Atsushi Sanada, “Planar two-dimensional negative refractive index structures at THz regions”, 2011 Korea-Japan Metamaterial Forum, July 8, 2011, Seoul, Korea

[5] 上田哲也, 「非相反メタマテリアルの設計とモデリング」, 2011 Microwave Workshop and Exhibition, 2011年12月1日, パシフィコ横浜, 神奈川

[6] 上田哲也, 「非相反右手/左手系複合メタマテリアル」, 日本磁気学会 第180回研究会「メタマテリアルからみた光と磁気」, 2011年10月21日, 中央大学駿河台記念館, 東京

[7] M. Hangyo, “Terahertz technology and metamaterials”, Photonica 2011, April 31, Belgrade, Serbia

[8] M. Hangyo, K. Takano, F. Miyamaru, and K. Murata, “Fabrication and characterization of THz Metamaterials”, 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and THz Waves, Oct. 3, 2011, Houston, USA

[9] M. Hangyo, K. Takano, Y. Chiyoda, F. Miyamaru, T. Nishida, M. W. Takeda, H. Suo, S. Ohno, T. Ishihara, and K. Murata, “Photoconductive antennas loaded with meta-atoms for terahertz radiation”, 3rd International Conference of Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2012), April 21,

2012, Paris, France

[10] M. Kitano, “Non-reflectivity for circular polarization in chiral media and EIT phenomena in metamaterials”, The 4th Yamada Symposium on Advanced Photons and Science Evolution 2010, JICA Osaka, Osaka, June 15, 2010

[11] M. Kitano, Y. Tamayama, and T. Nakanishi, “No-reflection no-refraction metamaterial for circularly polarized light,” Asia-Pacific Radio Science Conference, Toyama International Conference Center, Toyama, Sep. 25, 2010

[12] Takuo Tanaka, “Three-dimensional plasmonic metamaterials”, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology 2011, 2011/12/04, Hawaii, USA

[13] Teruya Ishihara, “Nano-porous gold as metamaterial”, Asia Nano, Sep.8, 2012, Lijiang, China

[14] Teruya Ishihara, Takafumi Hatano, Hiroyuki Kurosawa, Yosuke Kurami, and Naoshi Nishimura, “Transverse voltage induced by circularly polarized obliquely incident light in plasmonic crystals”, SPIE Aug.15, 2012. San Diego, USA

[15] Takuo Tanaka and Kanna Aoki, “Self-organized assembly of three-dimensional metamaterials”, 6th International Conference on Nanophotonics (ICNP2012), 2012/05/28, Beijing, China

[16] Takuo Tanaka, “Towards three-dimensional isotropic metamaterials”, 4th International Conference on Smart Materials, Structures and Systems (CIMTEC 2012), 2012/06/10, Montecatini Terme, Italy

[17] Takuo Tanaka, “Self-organized assembling of three-dimensional plasmonic metamaterials”, The 3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'12), 2012/04/19, Paris, France

[18] 迫田和彰, 「メタマテリアルのディラックフォトン」, 第20回 計算数理工学フォーラム, 2011年3月30日, 愛知工業大学 (愛知県)

#### (4) 「国民との科学・技術対話」について

本領域が主催した対話については、必ずしも一般市民が対象というわけではないが、広く一般のマスメディアにより聴衆の募集を行った点で、上記の第1および第2回電磁メタマテリアル講演会は社会・国民に対してわかりやすく説明する活動に該当すると考える。講演は、いずれの場合も、午前は2件のチュートリアル講演、午後は3件の特別講演から成る。朝9時から午後5時過ぎまで、時間を十分取り、特にチュートリアル講演では、非専門家にもわかるような丁寧な講演を心がけた。また、講演だけでは理解できないことがあると考え、テキストを無料配布した。聴講者は半数以上が企業関係者で、ほとんどが男性であった。アンケートでは、わかりやすいという回答が多かったが、難しいという回答もあった。この原因は、聴講者の専門分野が多岐にわたることが一因と思われる。300名以上入る会場を用意したが、聴講者募集から1週間程度で満員となり、聴講を制限せざるを得なかった。メタマテリアルに対する社会的関心が高い証拠であると考ええる。

以上の他、領域のメンバーが、一般向けの講演会などでメタマテリアルに関する講演を行った。例えば、石原照也 「メタマテリアルと透明マントー負の屈折率を持つ物質」

日本物理学会公開講座 透明マントは作れるかー光科学の最先端ー

2011年11月5日 (土曜) 東京大学本郷キャンパス 小柴ホール

参加者の属性： 高校生16名を含む72名。

など、約 10 件で講演を行った。

## 6. 研究組織と各研究項目の連携状況

研究項目は、A01 電磁波（マイクロ波・テラヘルツ波）メタマテリアルと A02 光メタマテリアルの2項目のみであるが、それぞれの項目において、メタマテリアルの構成法として、周期構造を用いる方法と、共鳴構造を用いる方法がある。また、図22は、6つの計画研究と公募研究の関係を示している。研究項目間の連携としては、これまでも述べてきたように、マイクロ波領域の研究者と光領域の研究者の電磁波に対する考えの大きな違いを如何に乗り越えて、実効的な連携を実現するかが課題である。このために、研究会などではできるだけ自由な議論の場を設けるようにした。特に、本領域と連携している学振の先導的研究開発委員会ならびに国際高等研プロジェクトにおいて、夜を徹しての議論がなされた。お互いの考え方をじっくり聞くことにより、「目から鱗」という言葉が聞かれるようになった。その結果、マイクロ波領域で真田ら (A01 ア) によって創始された右手/左手系複合伝送線路型メタマテリアルの考えが、光領域の迫田 (A02 カ) によって一般化されたり、上田ら (A01 ア) のマイクロ波領域での非相反メタマテリアルが、澤田ら (A02 ウ) により物性論的な解釈を誘起するなどの、従来になかった交流が始まっている。公募研究については、計画研究には含まれないテーマや補強を必要とするテーマを採択し、新しい展開と研究の加速を狙っている。例えば、落合 (A02 公募) はクローキング (透明マント) の理論、菅 (A01 公募) は電子ビームを用いたメタマテリアルからのテラヘルツ波放射の研究を行っているが、どちらも、計画研究には含まれていなかったものである。後者は、萩行 (A01 イ) とも協力・刺激しあいながら研究を進めている。さらに、上田 (A01 イ) はかつてスミス・パーセル放射の研究をしていたこともあり、メタマテリアルからのテラヘルツ波放射研究に参加しつつある。以上の他にも、物理、電気電子工学、材料科学、マクロ分子化学、プラズマ物理の研究者の間で、様々な連携がとられつつある。メタマテリアルという新分野が垣塙となつて、従来は交流がなかった分野の研究者が会し、刺激を受けて、新しい発想が生まれるのが原因であると考えられる。

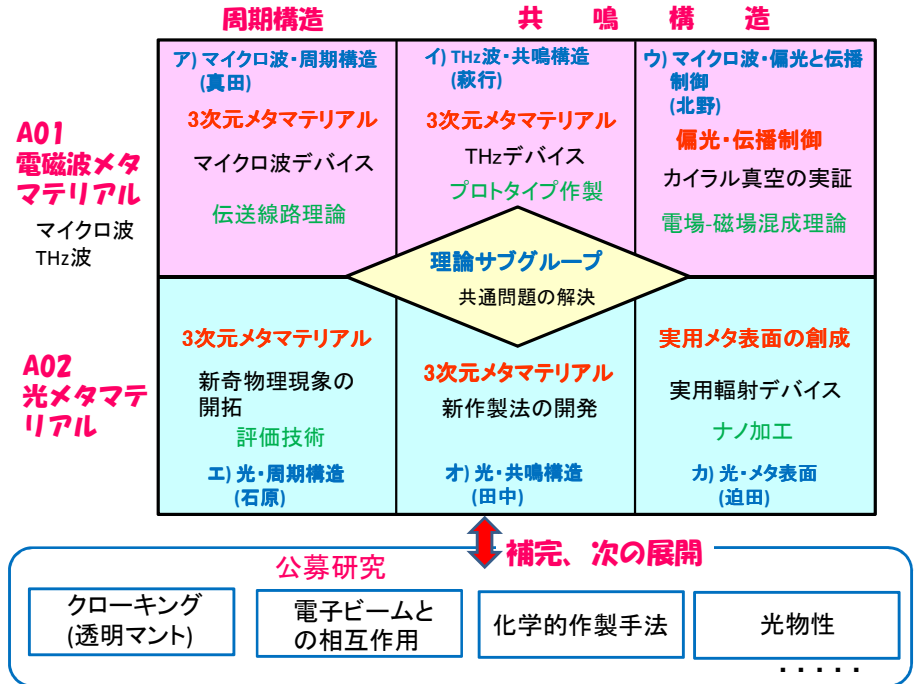


図22 6つの計画研究と公募研究

### 研究項目の課題名及び参画している研究者の所属職氏名 (計画研究の\*は代表者、他は分担者)

#### 研究項目 A01 電磁波 (マイクロ波・テラヘルツ波) メタマテリアル

計画研究 ア 「周期構造を利用したマイクロ波メタマテリアルの開発と応用」

\*真田篤志 山口大学・理工学研究科・教授

久保 洋 山口大学・理工学部・教授

堀井 康史 関西大学・総合情報学部・教授

上田哲也 京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・助教

宇野 亨 東京農工大学・共生科学技術研究科・教授

計画研究 イ 「共鳴構造を利用したテラヘルツ波メタマテリアルの作製と機能」

- \*萩行正憲 大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
 永井正也 大阪大学・基礎工学研究科・准教授  
 宮丸文章 信州大学・理学部・准教授  
 宮寄博司 東北大学・工学研究科・准教授
- 計画研究 ウ 「構造共鳴を利用したマイクロ波の偏光および伝播制御」  
 \*北野正雄 京都大学・工学研究科・教授  
 酒井 道 京都大学・工学研究科・准教授  
 中西俊博 京都大学・工学研究科・助教  
 久門尚史 京都大学・工学研究科・准教授
- 公募研究 「磁気誘電効果を用いた単一媒質メタマテリアル素子の探索」  
 安 東秀 東北大学・金属材料研究所・助教
- 公募研究 「任意屈折率設計のための2次元スペクトル界を用いた金属周期スリット構造解析」  
 鈴木健二 茨木大学・工学部・助教
- 公募研究 「有機半導体材料による双安定テラヘルツメタマテリアルの創製」  
 松井龍之介 三重大学・工学研究科・准教授
- 公募研究 「フェムト秒電子ビームとテラヘルツ波メタマテリアルを用いた逆チェレンコフ放射の研究」  
 菅 晃一 大阪大学・産業科学研究所・助教
- 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」  
 高原淳一 大阪大学・工学研究科・教授

## 研究項目 A02 光メタマテリアル

- 計画研究 エ 「周期構造を利用した光メタマテリアルの作製と物理」  
 \*石原照也 東北大学・理学研究科・教授  
 西村直志 京都大学・情報科学研究科・教授  
 富田知志 奈良先端科学技術大学院大学・先端物質科学研究科・助教  
 小野田 勝 秋田大学・工学資源学部・准教授  
 澤田 桂 (独)理化学研究所・放射光科学研究センター・研究員  
 大野誠吾 東北大学・理学研究科・助教
- 計画研究 オ 「共振型3次元メタマテリアルの作製と機能評価」  
 \*田中拓男 (独)理化学研究所・田中メタマテリアル研究室・准主任研究員  
 彌田智一 東京工業大学・資源化学研究所・教授  
 藤川茂紀 九州大学・カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所・准教授
- 計画研究 カ 「プラズモン共鳴型光波メタマテリアル費用面の創製技術の開発」  
 \*迫田和彰 (独)物質・材料研究機構・量子ドット研究センター・センター長  
 岡本敏弘 徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・助教  
 田丸博晴 東京大学・工学研究科附属光量子科学研究センター・特任講師  
 宮崎英樹 (独)物質・材料研究機構・量子ドット研究センター・グループリーダー  
 岩長祐伸 (独)物質・材料研究機構・量子ドット研究センター・主任研究員  
 杉本喜正 (独)物質・材料研究機構・ナノテクノロジー融合センター・主席研究員
- 公募研究 「ボトムアップ手法によるメタ原子集積体の自動形成」  
 藪 浩 東北大学・多元物質科学研究所・准教授
- 公募研究 「MEMS駆動可変構造による光メタマテリアルの機能化」  
 金森義明 東北大学・工学研究科・准教授
- 公募研究 「ナノ粒子の自己集積による金属複合超格子構造の作製」  
 岡崎健一 名古屋大学・工学研究科・助教 (平成24年5月から京都大学・産官学連携本部・特定准教授に異動のため辞退)

公募研究 「超短パルス光干渉加工法を用いた新しいメタマテリアルの開発」

中田芳樹 大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授

公募研究 「二重径を有する金属ナノロッドの電気化学形成」

中山雅春 山口大学・理工学研究科・教授

公募研究 「電子共鳴と構造共鳴のインタープレイによる新奇メタマテリアルの研究」

石原 一 大阪府立大学・工学研究科・教授

公募研究 「透明マントの設計とその応用研究」

落合友四郎 大妻女子大学・社会情報学部・准教授

## 7. 研究費の使用状況

マイクロ波領域では、

設計ツール: 電磁界シミュレータ (京都工芸繊維大、関西大、山口大)

メタマテリアル作製装置: プリント基板加工装置 (関西大)、マイクロ波トランジスタアンプ (京大)

メタマテリアル評価装置: マイクロ波モジュール (山口大)、ネットワークアナライザ (山口大、京都工芸繊維大、京大)

を購入したが、設計ツールで電磁界シミュレータが複数あるのは、メタマテリアルの設計には日常的に使用するためである。ただし、互換性のあるツールを購入し、領域内での設計モデルレベルでのスムーズなデータのやり取りを実現している。作製装置のプリント基板加工装置は関西大で主に使用しているが、今後、マイクロ波関係研究者でオープンに使えるようにする予定である。評価装置については、周波数領域の異なるものがいくつか揃えられているが、これも、領域内の研究者がオープンに使えるようにする予定である。

テラヘルツ領域では、メタマテリアル作製用に高強度フェムト秒レーザーを導入し (阪大)、レーザー加工装置を組み上げたが、領域内からの要望に応じて試料を提供できる準備が整った。このフェムト秒レーザーは、試料作製のみならず、高強度のテラヘルツ波発生用の光源としても利用する予定である。超微細インクジェットプリンタは、テラヘルツメタマテリアル作製用に使用してきたが、性能を向上させ、領域内外のグループに試料を提供している。また、使用を希望する研究者には、使用法の指導などを行っている。領域内には、テラヘルツ時間領域分光装置が複数台あるが、高強度化やエリプソメトリなどの新機能を付け加え、領域内外の希望者の測定依頼にできるだけ対応するようにしている。

光領域では、

試料作製装置: 全自動電子線蒸着装置 (理研)、イオンビームスパッタ装置 (東北大)

試料評価装置: 分析装置付電子顕微鏡 (理研)

を購入した。イオンビームスパッタ装置は、高精度の成膜ができるように現在レーザーエリプソメトリによるinsitu成長モニターを開発中であるが、完成後は領域内のグループからの作製依頼にも対応する予定である。全自動電子線蒸着装置および電析装置付電子顕微鏡についても、領域内研究者の使用が可能である。

海外の研究者との交流を図る一環として日韓メタマテリアルフォーラムを毎年開催しているが、昨年度は韓国梨花女子大で開催した。日本側から約20名が参加したが、領域内からの参加者には旅費などを総括班経費から援助した。このために、韓国側からも多くの参加者を得、計126名の盛会となった。このおかげで、本年のつくばで開催された第2回のフォーラムでも、韓国側から多くの参加者を得て、成功裏に終了した。また、総括班経費は、領域のスムーズな運営を図るために、事務を一部専門の業者に委託している。ホームページの管理、公開講演会や全体会議の参加申し込みなどがスムーズとなり、その分、研究に専念できる効果があった。



## 8. 今後の研究領域の推進方策

この学問領域は今世紀に入って成立した若い領域である。メタマテリアルは、マイクロ波から可視光領域までの広い周波数にわたる共通のコンセプトであるとともに、物性物理、電気電子工学、材料科学、超分子化学、プラズマ科学など広い学問領域に関連している。本領域には、マイクロ波から可視光までを含む研究者が参加しているが、これまでほとんど交流がなかったマイクロ波工学と光物性物理学の間に、相互理解と共同研究が、特に若い研究者間で広がりつつある。例えば、先に紹介したように、上田 (A01 ア) の (時間反転不変性を破る) 磁性体を用いたマイクロ波領域での、非相反メタマテリアルにおける方向に依存する電磁波の伝搬特性は、マルチフェロイック物質やカイラルエッジ状態などとの類似性から物性理論の澤田や実験の富田 (いずれもA02 エ) の注意を引き、共同研究が始まっている。また、迫田 (A02 カ) のメタマテリアルのバンド構造についての、群論によるディラックコーンの生成条件の導出は、真田ら (A01 ア) のオリジナルになる右手/左手系複合メタマテリアルの伝送線路理論を物性論の立場から理解しようとした結果である。また、ナノ材料科学や超分子化学の分野での新奇なナノ構造作製技術が開発されつつあり、これらの分野からはメタマテリアルは興味深い研究ターゲットとなりつつある。さらに、マイクロマシン/MEMSの分野からも動的なメタマテリアル作製に寄与できるということで、研究が始まっている。メタマテリアルは学術的に興味深いとともに、光領域での新機能材料として、また、マイクロ波やテラヘルツ波領域では、実用的なデバイスへの応用の観点から、企業研究者の注目も集めている。

以上のことを踏まえ、以下のような推進方策を実行する。

- 1. マイクロ波と光領域の研究者の交流のいっそうの推進** 全体会議等において、両者が議論できる場を十分持つように工夫する。これまでは、学振の先導的研究開発委員会や高等研プロジェクトと連携することにより、長時間の議論を通じた交流ができたが、これらが終了した現在、学振の産学協力研究委員会の立ち上げが企画されているので、可能な範囲で連携したい。
- 2. 領域内研究者および外部新規参入者への支援** メタマテリアル分野は新しい分野のため、領域内の研究者でも標準試料による測定技術の向上、作製した試料の測定依頼、シミュレーションプログラムの選択など、領域内での支援を求める声が強いので、窓口を設けて対応する。また、領域外からこの分野に参入したい研究者に対しても、窓口を設けて支援する。
- 3. 周辺分野との連携** メタマテリアル分野は、物性物理、電気電子工学をはじめ、プラズモニクス、材料科学、超分子化学、マイクロマシン/MEMSなどの周辺分野と密接に関連している。これらの分野との連携を促進するため、他の新学術領域 (例えば、「半導体における動的相関電子系の光科学 (五神)」、「融合マテリアル: 分子制御による材料創成と機能開拓 (加藤)」) などと合同のシンポジウムを開催する。また、様々な学会や研究会などにおいてメタマテリアルについて紹介する機会 (講演等) を提案する。
- 4. 若手研究者の育成** 毎年開催しているチュートリアル講演を含む公開講演会を、引き続き実施する。アンケートに基づき、よりわかりやすい内容とすることを心がける。また、この講演会の内容に基づいてテキストを執筆し、若手研究者がスムーズにこの分野に入るための助けとしたい。さらに、企業の研究者にも役立つような講演会としたい。若手研究者が企画する研究会を開催してモチベーションの向上を促進する。
- 5. 海外との連携** 現在、日韓メタマテリアルフォーラムを毎年交互に、韓国と日本で開催しているが、さらに、英国などにも輪を広げて、情報交換と共同研究開始の場としたい。2012年のフォーラムでは、英国の研究者も一部参加し、今後の英国での開催について既に検討を行っている。
- 6. 情報発信の充実** これまでは、研究そのものに重点がおかれていたが、今後は、ホームページなどの情報発信も充実させる。ホームページで公開しているニューズレターは既にNo. 14まで発行されているが、チュートリアルな解説なども載せるようにしたい。

## 9. 総括班評価者による評価の状況

米国UCLAの伊藤龍男教授、(財)物質・材料機構の潮田資勝理事長、NTT物性科学基礎研究所の納富雅也特別研究員にアドバイザーをお願いしている。これまで、全体会議や第2回日韓マテリアルフォーラムに参加していただいてコメントをいただく予定であったが、あいにく日程が合わずにご参加いただけていない。至急、資料を送付してコメントをいただく予定である。