

領域略称名：メタマテリアル
領域番号：2208

平成27年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「(研究領域名) 電磁メタマテリアル」

(領域設定期間)

平成22年度～平成26年度

平成27年6月

領域代表者

物質・材料研究機構・先端フォトニクス材料ユニット・ユニット長・

迫田 和彰

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	6
2. 研究領域の設定目的の達成度	8
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	12
4. 審査結果の所見及び中間評価で指摘を受けた事項への対応状況	14
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	16
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等）	21
7. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	28
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	30
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	34
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	35
11. 総括班評価者による評価	37

研究組織

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00	22109001 電磁メタマテリアルの 研究推進	平成22年度～ 平成26年度	萩行 正憲/ 迫田 和彰	大阪大学・レーザーエネルギー学研 究センター・教授/ 物質・材料研究機構・先端フォトニ クス材料ユニット・ユニット長	6
A01 計	22109002 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	平成22年度～ 平成26年度	真田 篤志	山口大学・理工学研究科・教授	5
A01 計	22109003 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	平成22年度～ 平成26年度	萩行 正憲/ 永井 正也	大阪大学・レーザーエネルギー学研 究センター・教授/ 大阪大学・基礎工学研究科・准教授	5
A01 計	22109004 構造共鳴を利用したマ イクロ波の偏光及び伝 播制御	平成22年度～ 平成26年度	北野 正雄	京都大学・工学研究科・教授	5
A02 計	22109005 周期構造を利用した光 メタマテリアルの作製 と物理	平成22年度～ 平成26年度	石原 照也	東北大学・理学研究科・教授	9
A02 計	22109006 共振型3次元メタマテ リアルの作製と機能評 価	平成22年度～ 平成26年度	田中 拓男	理化学研究所・田中メタマテリアル 研究室・准主任研究員	3
A02 計	22109007 プラズモン共鳴型光波 メタマテリアル表面の 創製技術の開発	平成22年度～ 平成26年度	迫田 和彰	物質・材料研究機構・先端フォトニ クス材料ユニット・ユニット長	6
計画研究 計 7 件					
A01 公	23109501 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	平成23年度～ 平成24年度	安 東秀	東北大学・金属材料研究所・助教	1
A01 公	23109505 任意屈折率設計のため の2次元スペクトル界	平成23年度～ 平成24年度	鈴木 健仁	茨城大学・工学部・助教	1

	を用いた金属周期スリット構造解析				
A01 公	23109506 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	平成23年度～ 平成24年度	松井 龍之介	三重大学・工学系研究科・准教授	1
A01 公	23109507 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	平成23年度～ 平成24年度	菅 晃一	大阪大学・産業科学研究所・助教	1
A01 公	23109508 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	平成23年度～ 平成24年度	高原 淳一	大阪大学・工学研究科・教授	1
A01 公	25109708 メタマテリアルのため の動的電流密度汎関数 理論の構築	平成25年度～ 平成26年度	樋口 雅彦	信州大学・理学部・教授	4
A01 公	25109709 有機-無機半導体界面電 荷移動による光誘起プ ラズモニック・メタマテ リアル	平成25年度～ 平成26年度	松井 龍之介	三重大学・工学系研究科・准教授	1
A01 公	25109714 小形メタマテリアル構 造によるヘリカルアン テナの性能向上	平成25年度～ 平成26年度	道下 尚文	防衛大学校・電気情報学群・准教授	1
A02 公	23109502 ボトムアップ手法によ るメタ原子集積体の自 動形成	平成23年度～ 平成24年度	藪 浩	東北大学・多元物質科学研究所・准 教授	1
A02 公	23109503 MEMS 駆動可変構造 による光メタマテリア ルの高機能化	平成23年度～ 平成24年度	金森 義明	東北大学・工学系研・准教授	5
A02 公	23109504 グラフェンを利用した テラヘルツ帯アクティ ブプラズモニックメタ	平成23年度	尾辻 泰一	東北大学・電気通信研究所・教授	1

	マテリアルの研究				
A02 公	23109509 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	平成23年度～ 平成24年度	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	1
A02 公	23109510 二重径を有する金属ナノロッドの電気化学形成	平成23年度～ 平成24年度	中山 雅晴	山口大学・理工学研究科・教授	1
A02 公	23109511 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	平成23年度～ 平成24年度	石原 一	大阪府立大学・工学研究科・教授	1
A02 公	23109512 透明マントの設計とその応用研究	平成23年度～ 平成24年度	落合 友四郎	大妻女子大学・社会情報学部・准教授	1
A02 公	23109513 ナノ粒子の自己集積による金属複合超格子構造の作製	平成23年度～ 平成24年度	岡崎 健一	名古屋大学・工学研究科・助教	1
A02 公	25109701 規制異相界面メタマテリアル	平成25年度～ 平成26年度	村越 敬	北海道大学・理学研究科・教授	1
A02 公	25109702 MEMS駆動型電磁誘起透明化メタマテリアルによる動的光制御	平成25年度～ 平成26年度	金森 義明	東北大学・工学系研・准教授	5
A02 公	25109703 光学応用に資する可視光応答二分割スプリットリングの大面積および集積構造の作製	平成25年度～ 平成26年度	久保 祥一	東北大学・多元物質科学研究所・助教	1
A02 公	25109705 精密機械加工を援用した自己組織化による超微細素子の効率的製造法	平成25年度～ 平成26年度	吉野 雅彦	東京工業大学・理工学研究科・教授	1
A02 公	25109706 電磁現象におけるトポ	平成25年度～ 平成26年度	村上 修一	東京工業大学・理工学研究科・教授	1

	ロジカル相の理論的探索				
A02 公	25109707 可溶性光メタマテリアル	平成25年度～ 平成26年度	梶川 浩太郎	東京工業大学・総合理工学研究科・教授	2
A02 公	25109712 多重共鳴型メタマテリアルの研究	平成25年度～ 平成26年度	石原 一	大阪府立大学・工学系研究科・教授	1
A02 公	25109713 プラズモニクメタマテリアルのナノ分光研究	平成25年度～ 平成26年度	井村 考平	早稲田大学・理工学術院・教授	1
公募研究 計 24 件					

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を発展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

【研究の対象】

電磁気学に関するマッ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比誘電率 ϵ と比透磁率 μ が登場する。これらの量は物質に含まれる原子やその配列から決定される量であるが、光領域ではスピンの光の高周波数に応答できないので自然界に存在する物質は $\mu \doteq 1$ であり、誘電率の値もまた限られている（図 1）。金属では ϵ は負の値をとりうるが、この場合バルクな金属内に光は到達できない。しかし、金属表面上で光と金属中の電子の集団振動であるプラズマが結合してプラズモン-ポラリトンを構成し、表面を伝播できるようになる。この性質を利用したのがプラズモニクスと呼ばれる分野である。一方、1968年にロシアの Veselago が ϵ と μ の両者が負の場合に何が起こるかを考察し、負の屈折や平板がレンズの役割をするなどの普通の光学とは異なる極めて異常な性質が現れることを示した。この場合、 ϵ と μ の両者が正の普通の物質では、波数、電場、磁場ベクトルが右手系をなすのに対し、負の屈折率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。しかし、 μ が負の物質が自然界に存在しなかったことから、この研究は永らく忘れ去られていた。ところが、英国の Pendry が 1999 年に電気回路との類推から、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（分割リング共振器と呼ばれる）が LC 共振により磁気的な応答を示し、さらに金属細線と組み合わせると負の屈折率が実現できることを理論的に示した。2001 年には Smith らによって図 2 に示されるような試料により、マイクロ波領域で負の屈折率が実現できることが示された。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、既により単純な構造を超微細加工技術により作製することで、2 次元ではあるが光領域の負の屈折率が実現されている。本研究領域では、マイクロ波から光領域までの電磁波（図 3）に対して、その波長より十分小さな内部構造（サブ波長構造、この単位をメタ原子と呼ぶ）をうまくデザインして生じる様々な異常な電磁応答・機能の発掘並びにその実験的証明、および、そのデバイス応用に関する研究を行う。このようにサブ波長構造により、 ϵ や μ を自在に制御した人工物質は、自然界にある物質を超えた物質という意味で一般的にメタマテリアルと呼ばれている。

【学術的背景】

著名な物理学者ランダウの電磁気学の教科書でも光領域では $\mu = 1$ とおかねばならないと述べられているように、物理学でもそれが常識であると捉えられてきた。即ち、図 1 の第一象限の $\mu = 1$ の領域だけが光学材料の開発対象であり、最近のプラズモニクスの展開によって漸くそれが第 2 象限に広がったのである。さらに第 3、第 4 象限の物質が手に入れば、光学の教科書を一から書き直さなければならないような一大変革が起こり、マイクロ波から光領域までの電磁波デバイスの形態に大きな変化をもたらすものと考えられる。応用が先行したマイクロ波領域では既に通信デバイスやレーダーなどへの応用が試みられており、この分野のトピックスのひとつとなっている。周期的な加工を施した人工物質という意味では、主に誘電体（絶縁体）を周期的に加工することにより電磁波を制御しようとするフォトニック結晶があるが、この場合、周期と波長が同程度であり、回折光が生じる複雑さがある。これはフォトニック結晶が構造周期と電磁波の構造共鳴を利用しているからである。一方、メタマテリアルは有効誘電率、有効透磁率を持った有効媒質と見做すことができるため複雑なデバイスへの応用では本質的に有利であり、LC 共鳴を利用しているため構造を小さくできる利点がある。さらに、フォトニック結晶においては誘電率が 10 程度の誘電体を利用しているのに対し、メタマテリアルでは誘電率が負の大きな値を持つ金属を利用している点も、より強力な共鳴現象を利用できる点で有利になる場合がある。領域代表者らが参加した 2004 年のフォトニック結晶主体の国際会議である PECS IV では既に、欧米の研究の中心がフォトニック結晶からメタマテリアルに移りつつあった。以上のようなメタマテリアルの実現は微細加工技術に伴って急速に発展したものであり、メタ原子を設計し並べることにより、自然界にある原子のみを用いて作られてきた従来の材料を越えて、より柔軟で広範囲の性質の材料を人間の手で作り出すことができることを意味している。

【本領域の発展がどのように学術水準の向上・強化につながるか】

固体物質とは原子や分子の集合体と考えるのがこれまでの常識であった。しかし、メタマテリアルの概念の発展により、人間が自由に設計したマクロとマイクロの間にある要素が自然界にない性質を有する物質を構成できるとの認識が一般化すると考えられる。本領域における電磁メタマテリアルの発展を契機に、音波、熱、量子力学、その他の分野でもこの概念は一般化し、広く自然科学における基本概念となると予想される。その結果、我々は電磁波をはじめとする自然界のあらゆる波動現象の究極的な制御技術を手にすることができ、学術的な貢献にとどまらず、エネルギー、環境、情報・通信など、様々な面での社会貢献につながることは明らかである。

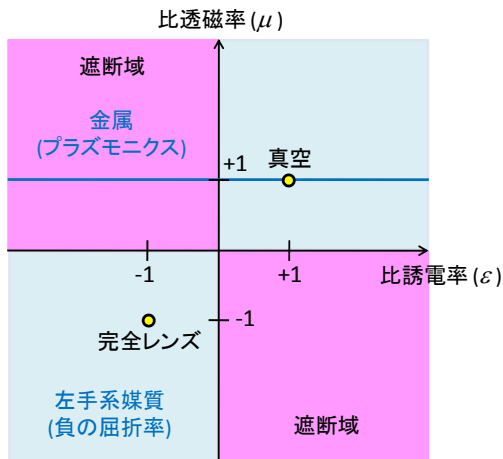


図 1 誘電率と透磁率による物質の分類



図 2 分割リングと金属細線を組み合わせた最初のメタマテリアル(D. R. Smith らによる)

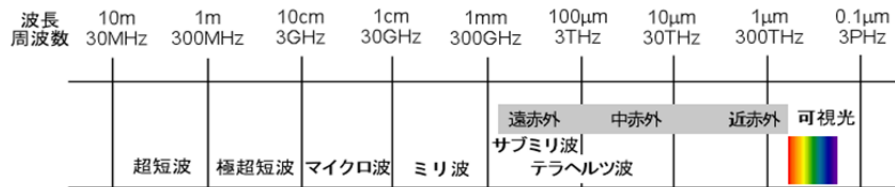


図 3 電磁波の名称と波長、周波数

2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

【期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか】

メタマテリアルの分野は、周波数によって構造作製の困難さに大きな違いがあり、マイクロ波領域では既に具体的な応用に着手されているのに対し、光領域では求める ϵ や μ を与える構造や物質の模索、並びに、予想される異常な現象そのものの実証に重点が置かれている。従って、後述するように波長によって具体的な目標は異なるが、共通の目標として、1. 我が国の得意なもの作り技術を生かした3次元メタマテリアル作製手法の確立、2. これまで世界をリードしている異常な偏光特性を有するメタマテリアルの理論と作製法の確立、3. Veselago が予言した負の屈折率物質における特異な現象のうち、未だに実験的検証がなされていない逆ドップラー効果、逆チェレンコフ効果、逆放射圧の実証と新奇な現象の発掘、を設定する。また、マイクロ波領域では通信関連デバイス、テラヘルツ波・光領域では2次元のメタマテリアル表面（メタ表面と呼ぶ）の開発を通してのメタマテリアルの実用化を実現する。

以下では、各計画研究について達成度を記す。

【計画研究ア班】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 計画研究アでは次の3項目の課題に対して当初の計画以上の成果を得た。

(1) メタマテリアルの多態性を生かした系統的な新規メタマテリアル構造提案については、当初の計画通り CRLH 媒質理論を基に①マイクロ波デバイス・回路・アンテナ応用に資する1次元から3次元までの新規のメタマテリアル媒質構造(図 4)を提案し、②FDTD 法に基づく周期構造散乱界解析ソルバおよび FDFD 法に基づく周期構造の分散特性ソルバを持つメタマテリアルシミュレータを開発するとともに、③人工材料に対するマイクロ波帯から 1.1THz までの実効複素誘電率および実効複素透磁率の評価システムを構築した。これによりマイクロ波領域で回折限界を超える解像動作を持つ負屈折率レンズ動作を実証するなど目的を達成した。さらに当初の計画以上に、負屈折率特性を持つ SNG 異方性スラブ、変換電磁気学に基づく透明マントなど、CRLH 媒質から派生した新たなメタマテリアルを開発した。ここでは、計画研究カ（迫田）と真田によるマイクロ波ディラックコーンメタ表面の実現と異常透過現象の発見、A02 公募研究 23109510（中山）と真田との電気化学的手法による CRLH メタマテリアル金属ナノピラミッドの作製など、領域内および公募研究との交流により新たな領域の開拓につながった。

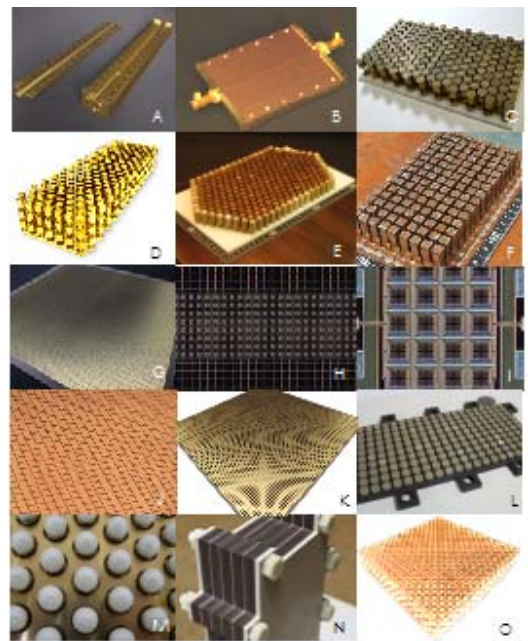


図 4 開発したマイクロ波帯メタマテリアルの例。

(2) 次世代応用システムのキーコンポーネントとなるデバイス応用化研究の推進については、当初の計画どおり、①低温同時焼成セラミック (LTCC) 技術で実装可能な積層型 CRLH 媒質の開発とマイクロ波帯超小型フィルタ等のデバイス応用、②磁性体を用いた非相反 CRLH メタマテリアルの実現と共振器等のマイクロ波デバイス開発、③CRLH 線路を用いたビーム走査アンテナ開発に成功し、目的を達成した(図 5)。さらに当初の計画以上に、負性インピーダンス変換器 (NIC) を用いたノン・フォスター素子を実現するとともに、微小アンテナの広帯域整合への応用可能性を示した。ここでは計画研究エ（富田・澤田）と上田の共同研究による磁気カイラル効果のマイクロ波帯における観測につながった。

(3) CRLH 理論のテラヘルツ波帯および光波領域への展開については、当初の計画どおり、他班をはじめとする他機関と共同で、半導体プロセスを用いてスケールダウンしたテラヘルツ波帯 CRLH 媒質や、赤外領域における負透磁率(MNG)媒質を実現するなど、概念を展開し目的を達成した(図 6)。

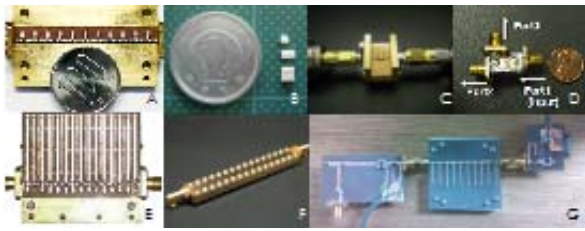


図5 開発したマイクロ波帯デバイス応用例



図6 試作テラヘルツ・光波領域メタマテリアル

【計画研究イ班】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

計画研究イ班の主な研究課題は、テラヘルツ波領域について、(1)メタマテリアルの設計と作製、(2)表面及び低次元伝播波の特性解明、(3)未実証現象の実験的検証と新現象探索である。

(1)メタマテリアルの設計と探索については、①TiO₂微小球の2次元配列による負の屈折率の実現、②分割リング共振器を2次元配列したメタシートの積層による3次元メタマテリアル、③超微細インクジェット工法による2次元および3次元メタマテリアルの作製と評価、特に、パルスレーザー照射による過渡現象の発見、④高性能なメタマテリアル波長版の開発、などの成果を得た。(2)表面及び低次元伝播波の特性解明については、①スミス-パーセル放射の理論的検討を行った。(3)未実証現象の実験的検証と新現象探索については、①2つの分割リング共振器による古典的EIT(電磁誘起透明化現象)の実証、②自己補対チェッカーボード構造の光学特性の精密制御とバビネの定理の実証、を達成した。以上により、当初の研究目標を達成した。

【計画研究ウ班】構造共鳴を利用したマイクロ波の偏光及び伝播制御

計画研究ウの主な目標の一つに光領域、テラヘルツ領域に先駆けて新しいアイデアを提案し実現することを挙げている。その一つとして、「カイラル真空」という概念を提案していたが、これをさらに一般化することで、楕円偏光に対して同様の現象が得られることが分かった。実験での実証は、旋光性のあるメタマテリアルでは誘電率なども変化することが分かったために困難であることが分かったが、この研究はメタ表面への研究へ進展し、特定の条件で反射波の偏光が入射波の偏光によらなくなるブリュースター現象の実証へとつながった。また、この反射透過制御の研究は、自己補対メタ表面での周波数無依存応答という研究も生み出した。

結合共振器を要素とするメタマテリアルは低群速度とその動的制御、非線形効果の増大を目標として挙げている。この研究においては、当初計画していた磁気結合を利用する方法以外にも、電場勾配結合や間接結合を利用する方法など新たな方法も開発し、低群速度伝搬や非線形効果の増大を実現している。そして、動的な群速度制御が可能なメタマテリアルも考案し、電磁波を保存/再生することにも成功した。これは、当初計画の予想より研究が進んだ例といえる。また、結合共振型メタマテリアルにおいて、2つの波長で共振する2重共振メタマテリアルという概念を提案し、第2次高調波発生の高効率化を実現した。

気体プラズマ導入した動的メタマテリアルの研究は、当初の計画通り、気体圧力制御による屈折率の複素平面上での制御やマイクロ秒オーダーでの動的な負屈折状態の実現に成功している。そして、なだれ状の負屈折状態の生成に関して、理論的解析と実験的実現にも成功し、分岐現象や高調波発生など非線形応答の検証にも成功している。

遺伝的アルゴリズムによるメタマテリアルの設計の研究においては、メタ表面における反射位相の制御、メタマテリアル線路およびメタマテリアルを導入した導波管の位相定数制御を目標に研究を行った。最適化の結果はいずれも良好な性能を示しており、本手法の有効性を実証している。また、偏光回転の抑制や隣接セルの影響なども検討し、十分な性能を得ている。回路モデルを用いた波動伝搬解析の研究においては、単導体素子を基本素子とする回路モデルを用いた解析から研究を開始し、より扱いやすい導体球と導体線を基本要素とするメタマテリアルの回路モデルの研究へと発展した。そして、当初は考慮していなかった放射損失も遅延相互作用という形で回路モデルに組み入れることができた。

【計画研究エ班】周期構造を利用した光メタマテリアルの作製と物理

サブ波長構造により特異な応答をもつメタマテリアルを作製するために、イオンビームスパッター装置を購入し、膜成長の実時間観察のための、4検光子ポラリメタを立ち上げた。これによってガラス基板上に金属、誘電体の多層膜を研究室内で実現できるようになった。東北大内の共同利用施設の電子線描画の他、アルミニウムのメタマテリアルに関しては、高度の技術をもつ計画研究(カ)のNIMSグループに依頼して作製した。サブ波長構造で回折がないにも関わらず、構造内の微視的電磁場分布によっ

て光起電力が発生することが明らかとなった。一方、ランダムなサブ波長スケールの孔をもつナノポーラスゴールドの光起電力の研究を行い、運動量移行に由来する縦起電力のみならず、横起電力の偏光依存性も同様に発生することから、周期性は本質ではないことがあきらかになった。これらの研究を通じて、人工構造体の光起電力の重要性について、より確信をいただくに至った。

計画では、ケルビン力顕微鏡を導入して光起電力の空間分布を測定する予定であったが、現状の構造で実現される起電力はケルビン力顕微鏡で測定するには、不十分であることが分かった。現在のところ、光起電力をケルビン力顕微鏡で測定できるほど、大きくする方針は立てられていない。一方、光領域の実験に先行して、テラヘルツ領域の測定を行う予定であったが、大震災を契機に、大学院生が一人、阪大レーザー研で実験することになったため、測定ターゲットをインクジェットプリンターで作製した凹型の光伝導アンテナとし、発生したテラヘルツ波の偏光特性を評価した。実験終了後、その経験をもとに、テラヘルツ時間領域分光のシステムを仙台に導入することとなった。

光起電力現象は電磁場のベリリー曲率と密接な関係があることが予測されたため、小野田、澤田と議論を行ったが、期間中に具体的な対応をつけることはできなかった。小野田は電子系と光学系のアナロジーを推し進め、光渦の振る舞いについて研究を進めた。またナノポーラスゴールドの光起電力の偏光依存性について、理論的な定式化を提唱した。澤田は富田と議論を密に議論を重ね、時間・空間反転対称性の破れたメタマテリアルの物理について考察を行い、メタ分子における巨大なカイラル磁気効果の発見につながった。

第二の研究ターゲットは石原らが特許出願中の表面プラズモン共鳴干渉ナノリソグラフィを発展させ、2次元メタマテリアルを簡便に作製する技術を開発することであった。試行錯誤のうえ、導波路モードを利用することにより3次元的な構造を作製する手法を提案し実証した。

【計画研究オ班】共振型3次元メタマテリアルの作製と機能評価

計画班オでは、光周波数で動作する共振型3次元メタマテリアルを少なくとも数ミリメートル角のサイズで加工できる、新しい加工技術の開発と、そこから生み出される新しい光学特性の測定ならびに評価を行う事を目的とした。

具体的には、フェムト秒極短パルスレーザーを用いたトップダウン加工法の高精度化に加え、DNAなどの生体分子や磁性微粒子に自己組織化を利用したボトムアップ的手段によってメタマテリアルの加工を試みた。そして、最終的にはトップダウン的手法とボトムアップ的手法を融合した新しいメタマテリアルの加工技術を開発した。また、ブロックコポリマーにおけるマイクロ相分離を利用した自己組織化ナノ構造の作製や、光合成によって増殖する螺旋藻類スピルリナのテンプレート金属化とその次々世代通信帯域の電磁応答機能の実証を行った。さらには、ウェットのナノコーティングをベースとした新しいナノ加工法（ナノコーティングリソグラフィ）と分子自己組織化によって作製されたナノ構造アレイをテンプレートとしたナノ構造作製アプローチの二つによって、ナノメートルオーダーで微細加工された、貴金属ナノ構造の大面积加工とその光学特性評価を行った。

共振型メタマテリアルの動作周波数を可視光全域にまで高める事はできなかったが、赤外領域で動作する3次元メタマテリアルをmm角で作製することに成功し、また真空の屈折率も低い実効屈折率の実現に成功するなど、研究目標に掲げた内容はほぼ達成することができた。

【計画研究カ班】プラズモン共鳴型光波メタマテリアル表面の創製技術の開発

本計画研究班は、(1)光波領域のメタ表面創製技術の開発、(2)メタ表面解析技術の開発と試料設計、(3)メタ表面の特性測定と電磁場制御機能の検証を主たる目的として研究を進めた。開始当初の目標として、①磁気双極子遷移の増強、②非線形光学効果の増強、③メタ表面の特異な表面電磁波モードの検証、④表面分散の改変による発光制御、⑤メタ表面のインピーダンス制御、⑥産業応用の6つの課題を設定して達成を目指した。

研究開始後の検討から、光波領域メタマテリアルでは大きな非線形性やそれを利用した素子特性の外場制御、光源の組込み易さ、電子分極等との連成波の利用が主たる利点であることが判明した。上記の目標③はこれに合致せず、すでにマイクロ波で実証研究が進んでいたことから、これを除く5つの目標に集中して検討を進めた。目標①では、電子線リソグラフィを用いてMIM（金属/誘電体/金属3層構造）型プラズモン共振器アレイの作製技術を開発し、Erイオンの磁気双極子遷移の増強を達成した。目標②では、やはりMIM共振器アレイを作製して第2高調波発生の増強効果を実証した。目標④では、豊田中研や和歌山大学と共同でメタ表面の分散制御による動的ビーム走査を実現した。目標⑤では、MIM共振器アレイによるインピーダンス制御を利用して光の完全吸収を達成した。目標⑥については、ナノインプリントリソグラフィによるメタ表面の量産技術を確立するとともに、波長選択的熱放射赤外光源の実装素子を開発した。特に平成26年度には、この実装素子を用いて炭酸ガス濃度計を作製して低消費電力化を実証した。以上により、目標③を除いてすべての当初目標を達成した。

さらに、光の波長よりも薄いメタマテリアル偏光子や蛍光増強基板の開発、光ディラックコーンの生成条件の解明と電子波ディラックコーンへの拡張等、当初計画には無かった多くの新しい研究成果も得られた。以上の研究成果は 41 報の学术论文や 36 件の招待講演で公表し、4 件の特許出願も行った。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ程度）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

(1) 萩行正憲教授のご逝去に伴う領域代表と計画研究イ班代表の交代

平成 26 年 10 月に、領域代表の萩行教授（大阪大学レーザーエネルギー学研究センター）がご逝去になった。本領域の運営と研究推進にとってかけがえのない方を失い、損失はたいへん大きいものがあった。領域の研究期間終了まで最善を尽くすべく、まず、新しく領域代表と計画研究イ班の代表者を選ぶこととした。領域代表については、総括班メンバー（計画研究代表者）で相談して迫田（物質・材料研究機構）が後任を引き受けることとし、計画研究イ班の代表者については、主に計画班内で相談して、同じ大阪大学の永井（大阪大学基礎工学研究科）に決した。

すでに、研究期間の最終盤の時期であったことから、研究計画自体についての修正はほとんど必要なく、主にシンポジウムや全体会合の開催時期に修正の必要が生じた。このため、領域代表の交代が文科省に承認された後に予算の繰り越しをお願いして、年度内に開催予定であった第 5 回日韓メタマテリアルフォーラム（ソウル開催）と全体会合（最終回、東京開催）を 4 ヶ月繰り下げて、平成 27 年 6 月と 7 月にそれぞれ開催することとした。

領域代表の交代に伴う種々の申請作業については、文科省学術研究助成課、ならびに、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターから多大なご支援を頂き、改めて感謝申し上げます。

研究成果の取りまとめ作業については、新代表を含めて総括班のメンバーはいずれも、本新学術領域の立案の段階から計画に加わっており、また、ニュースレターの発行（ウェブ上）や領域ホームページによる広報、領域全体会議やメタマテリアル講演会、日韓メタマテリアルフォーラムなどの講演会行事を従来から分担して実施してきている。このため、領域運営の共同体制はしっかりと出来上がっており、このことに関しては特段の障害は無かった。

計画研究イ班については、予算執行上の事務的な問題を最小限に抑える目的もあって、新代表は同じ大阪大学の永井准教授をお願いした。永井准教授はイ班が推進する THz 領域のメタマテリアル研究の第一人者で、同班の研究内容を詳細まで把握しており適任である。また、萩行教授ご自身が担当されていた研究内容については、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター萩行研究室の高野助教に新たにメンバーに加わって頂き、残りの期間の研究実施と成果の取りまとめをお願いすることとした。高野助教はこれまで研究班メンバーに登録はされていなかったものの、実質的には萩行教授と共同で研究を進めてきており、このメンバー追加で残りの研究期間の体制が整った。

平成 26 年 10 月以降の領域運営について、開催が遅れていた第 4 回日韓メタマテリアルフォーラムを 12 月に大阪で、平成 26 年度第 2 回全体会議を 3 月に東京でそれぞれ開催し、研究進捗状況の報告と討論、研究動向調査報告、ならびに、研究期間終了後の取りまとめ作業の方針決定などを行った。特に、第 4 回メタマテリアルフォーラムについては萩行教授の追悼の意味から大阪大学で実施した。急な開催であったにもかかわらず、韓国梨花女子大学の Jeong Weon Wu 教授をはじめ、韓国のメタマテリアル分野の錚々たる研究者の参加を得て、充実した研究会が実施できた。

研究成果の取りまとめについては、本事後評価報告書の作成に加えて、

- ① 第 5 回日韓メタマテリアルフォーラム（ソウル大学、平成 27 年 6 月）
- ② 領域全体会合（東京大学、平成 27 年 7 月）
- ③ 本領域の研究成果を中心とした学術図書の出版
- ④ メタマテリアル講演会の開催（平成 28 年 3 月）

を計画している。前 2 者についてはすでに実施準備が進んでいる。学術図書については現在、検討を進めているところで、平成 27 年度内、もしくは、平成 28 年度の早い時期の出版を目指す。

(2) 東日本大震災の影響

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災によって、東北大学理学研究科も被害を受けた。主要な実験装置が壊れることは免れたが、しばらくのあいだ建物への入室が制限され、復旧作業もできない状態であった。いつから実験が再開できるかも予測がつかなかったため、領域代表の萩行先生に相談し、光起電力の実験をおこなっていた M1 の学生を阪大レーザー研に派遣し、光伝導アンテナの幾何学的構造と放射特性の偏光状態をテラヘルツ時間分解法によって解析する共同研究を開始した。この学生が仙台に戻る時、萩行研究室のテラヘルツ時間分解法の技術は東北大に移植されることとなった。

(3) マイクロ波分野と光分野の意思疎通について

本領域の大きな特徴の一つとして、マイクロ波分野と光分野（THz 波を含む）の研究者の協同がある。

このことに関連して、技術用語、概念、基礎とする解析手法の違いなどが障害となることが懸念された。

実際、研究開始当初はいろいろと戸惑う場面もあったが、全体会合などを通して研究成果や進捗状況を報告し合ううちに理解が深まり、相互に研究のアイデアを提供したり、試料作製や測定で協力したりするなど大きな相乗効果があった。特に、最初マイクロ波分野の伝送線路理論にもとづいて考案されたディラックコーンが、光分野の研究者によって一般化され、ディラックコーンの形成条件が解明されるなどしたことは、この領域の研究成果の中でも特筆すべき成果である。

(4) その他の研究課題の実施に関して

特段の障害は無かった。

4. 審査結果の所見及び中間評価で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ程度）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

<審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

特に無し

<中間評価で指摘を受けた事項への対応状況>

中間評価の総合所見は以下の通りである。

「電磁メタマテリアルを新しい電磁・光学機能性材料と捉え、マイクロ波から光波までの電磁波に対して、新概念の創出、設計手法・数値計算・作製技術の開発、新規物理現象の解明を有機的に統合し、世界を主導する新分野を確立するとの挑戦的課題を掲げた領域である。植物由来のらせん状器官を利用したメタマテリアル作製に成功し、メタマテリアルの大量合成に道を拓いたこと、メタマテリアルでフラットバンドやディラックコーンを実現したことなど、個々の研究では優れた研究成果が出ており、高く評価できる。今後、領域全体として新しい知見を獲得して学術基盤を構築するとともに、この分野で先行している欧米諸国に対しての優位性を明らかにするため、最終的なターゲットをより明確にして、研究グループ間及び海外との連携を推進することが強く求められる。」

これを受けて実施した具体的な施策とその効果を以下に記す。

(1) 目標の明確化

欧米で先行するメタマテリアル研究は一言でいえば、Pendry や Veselago 流の「負の屈折率」の実現とそれを利用した特異的な光学現象の考案に主眼を置いている。これは、メタマテリアル研究とともに発達した、現代的な「巨視的電磁場理論」に裏付けられていると一般には考えられているが、その基礎にはなお未解明な部分が残っており、誤りであるとする理論研究もある。また、正確な数値解析によれば、実証されたと見なされている透明マントなどの新現象において、かなりの強度の散乱波が生じることが分かっており、実用性は乏しい。さらに言えば、任意の屈折率分布を仮定した数値解析を行って、新しい光学現象を予言したとする多くの理論研究が洪水のように報告されているが、荒唐無稽でもあり、我々はこのような研究とは一線を画す必要がある。

これに対して、例えばマイクロ波領域の研究について言えば、メタマテリアルの特徴である「左手系電磁波」は、メタマテリアルの登場以前に「後進波」の名称ですでに知られていた。特に、真田らを中心とする我が国の研究者によって CRLH 伝送線路理論が構築され、「負の屈折」に相当するような新現象がいち早く実証されたことは特筆に値する。また、我国の研究者が得意とする種々のナノ加工・ナノ組織化技術を用いることで、光波領域の優れた試料作製が期待できる。

そこで、本新学術領域研究では、負の屈折率の実現と応用には一定の注意を払うものの、それぞれが得意とする要素技術に立脚した、信頼性の高い試料作製と明快な理論的基礎に裏付けられた新現象の実証を通して、将来の実用化につながる研究成果の達成を主眼とした。各研究課題の研究目標については、「2. 研究領域の設定目的の達成度」と「5. 主な研究成果」を参照願いたい。

(2) 研究グループ間の連携強化について

まず、新学術領域の全グループが参加する全体会合を 2～3 回／年の頻度で開催して、各グループの研究成果や進捗状況の報告を行い、相互の情報共有に努めた。また、領域ホームページでの「自己紹介」や「研究紹介」を通じて情報共有を促進した。さらに、「評価技術の標準化」を目標として、すでに評価技術を確立しているグループに試料を送って特性を評価してもらい、自身の評価結果と照合することで評価技術の向上に努めた。また、各グループに所属している理論研究者を集めて理論小グループを組織し、この新学術領域研究を通して格段に進んだ光ディラックコーンやトポロジカル光波状態の理論に関する研究会を開催した。

このような活動を通して相互の得意分野に関する理解が進み、数多くの共同研究が実現した。詳細については「7. 研究組織と各研究項目の連携状況」を参照願いたい。

(3) 国内外との連携強化について

以下のような施策を実施した。

① 日本学術振興会産学協力研究委員会活動（メタマテリアル第 187 委員会、委員長：石原照也、計画研究エ班代表）：メタマテリアルの設計、機能、評価、作製、および、応用を目的として、平成 24 年 10 月から 5 年間（第 1 期）の活動を継続している。委員の内訳は学界 13 名、産業界 17 名、総数 30 名で、学界委員の大半が本新学術領域のメンバーである。この委員会を通して、企業との連携やメタマテリアルの応用分野の情報収集などを図ってきた。

② メタマテリアル講演会の開催：研究成果の社会への発信と普及、および、企業連携の促進などを目的として、学振 187 委員会と共催してこれまでに 5 回実施した（実質的には石原委員長を中心に本新学術研究のメンバーで実施）。

第 1 回 2011 年 3 月 11 日、東京大学本郷キャンパス工学部二号館

第 2 回 2012 年 3 月 9 日、東京大学本郷キャンパス工学部二号館

第 3 回 2013 年 2 月 21 日、東京大学本郷キャンパス工学部二号館

第 4 回 2014 年 3 月 7 日、東京大学本郷キャンパス伊藤国際ホール

第 5 回 2015 年 3 月 6 日、東京大学駒場キャンパス コンベンションホール

講演内容は、新学術領域メンバーによるチュートリアル講演と招待講演者（国内、および、海外）による研究成果の平易な解説を主体とした。チュートリアル講演中心であったことから、参加者はこの分野の専門研究者よりも、一般の企業関係者、大学関係者、学生などが主体であった。参加者数については、各回とも会場定員（約 300 名）に達する事前登録があり、たいへん活況であった。

招待講演者のうち、海外の研究者を記すと

- ・ 伊藤龍男 (UCLA) ・ D. R. Smith (Duke University)
- ・ A. Grbic (University of Michigan) ・ V. M. Shalaev (Purdue University)
- ・ C. Caloz (École Polytechnique de Montréal) ・ Samhyeon Lee (Yonsei University)
- ・ N. Engheta (University of Pennsylvania)
- ・ N. Zheludev (University of Southampton) ・ G Eleftheriades (University of Toronto)

であり、この分野の第一級の研究者ばかりである。このような機会を利用して、海外の最新の研究動向について情報を得るとともに、個人的な面識を得て新しい共同研究などを模索した。

③ 日韓メタマテリアルフォーラムの開催：韓国においてもメタマテリアルへの関心が高まり、上記の S. Lee 教授（延世大学）をはじめ、第一級の研究者がこの分野の研究で成果を上げている。そこで、韓国側は梨花女子大学の J. W. Wu 教授、日本側は領域代表者の萩行教授が発起人となって、2011 年から日韓メタマテリアルフォーラムを毎年開催して、研究成果の紹介や情報交換の機会とした。

第 1 回 2011 年 7 月 7 日－9 日、梨花女子大学（ソウル）

第 2 回 2012 年 6 月 28 日－30 日、つくば国際会議場（つくば）

第 3 回 2013 年 6 月 26 日－28 日、梨花女子大学（ソウル）

第 4 回 2014 年 12 月 22 日－24 日、大阪大学（豊中）

第 5 回 2015 年 6 月 29 日－7 月 1 日、ソウル大学（ソウル）（開催予定）

日韓メタマテリアルフォーラムでは若手研究者（大学院生を含む）の育成にも注力し、ポスター発表のための出張旅費を総括予算から支出するなどして、研究発表を奨励した。

④ シンポジウム・特別セッションの開催：国内外の学会開催に合わせるなどして、メタマテリアルに関するシンポジウムや特別セッションを企画し、実施した。詳細については「6. 研究成果の取りまとめ及び好評の状況」を参照願いたい。ここでは代表的なものを 3 つだけ記す。

- ・ ワークショップ「メタマテリアルアンテナ」、Microwave Workshop and Exhibition 2014、パシフィコ横浜（横浜市）、2014 年 12 月 12 日
- ・ オーガナイズドセッション「電磁メタマテリアルのアンテナ・マイクロ波応用」、電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会／マイクロ波研究会、東京工業大学、2014 年 9 月 18-19 日
- ・ 特別セッション「Photonic Dirac Cone and Topological Photonic States」、META 2014、南洋理工大学（シンガポール）、2014 年 5 月 23 日

⑤ 具体的な共同研究の実施：従来からの連携に加えて、上記の会合などを端緒としてして、新学術領域メンバー以外との共同研究による効率的な研究実施にも心がけた。共同研究の具体例を 3 つ記す。

- ・ ナノホールアレイ構造によるビーム走査：研究計画カ班 - 和歌山大学 - 豊田中研
- ・ プラズモニックナノロッドアレイによるメタ表面：研究計画カ班 - ノースウェスタン大学
- ・ CRLH 理論の展開と応用：計画研究ア班－モンリオール工科大学 - UCLA

5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）【研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する】

（3 ページ程度）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

【A01】

【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

(1) CRLH 理論に基づく新規媒質提案と特異物性

CRLH 理論に基づき 1 次元から 3 次元までの数多くの新規媒質を提案し特異物性を実証した。以下に代表的なものを示す。

- ①《計画研究エ（富田・澤田）と上田による領域内共同研究》カイラルメタ分子（図 1, Phys. Rev. Lett., 113, 235501 (2014)）
- ②金属球とワイヤによる 3 次元左手系媒質 (IEICE Trans. on Electron., EC95-C, pp. 1652-1657 (2012))
- ③誘電体共振器を用いた MNG/DNG 媒質 (IEICE Electronics Express, 9, pp. 65-80 (2012))
- ④《A02 公募研究 23109510 (中山)と真田の共同研究》電気化学的手法による金属ナノピラミッドの作製 (Int'l J. Electrochemical Science, 6, 4730-4736 (2011))
- ⑤誘電体共振器を用いた CRLH メタマテリアル (Appl. Phys. A, 103, pp.529-535, (2011))

(2) 材料設計ツールの開発

メタマテリアル設計のための周期構造散乱波解析および分散特性解析法を開発した。以下に代表的なものを示す。

- ①2 次元有限差分周波数領域法によるデバイ型分散周期構造に対する分散ダイアグラム解析アルゴリズム (IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 11, pp. 41-44 (2012))
- ②ドルーデ型分散周期構造に対する 2 次元 FDFD 法による分散ダイアグラム解析アルゴリズム (IEICE Electronics Express, 9, pp. 951-957 (2012))
- ③誘電体スラブ上の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法 (電子情報通信学会論文誌 B, J94-B, pp. 1086-1093 (2011))
- ④FDFD/FDTD 法による 2 次元周期構造解析法 (IEICE Trans. Comm., B93-B, pp. 2670-2672 (2010))
- ⑤FDFD/FDTD 法による損失媒質の周期構造解析法 (IEICE Electronics Express, 8, pp. 695-698 (2011))

(3) デバイス応用化研究

CRLH 理論に基づく積層型、非可逆メタマテリアルを含む各種マイクロ波デバイス・アンテナを開発した。以下に代表的なものを示す。

- ①磁性材料基板コプレーナ線路型非可逆 CRLH メタマテリアル (J. Appl. Phys., 115, 17E519 (2014))
- ②UHF 帯 RFID タグアンテナ用人工磁気壁シート (IEICE Trans. Electron, E95-C, pp. 1643-1651 (2012))
- ③準進行波型共振器とビーム走査アンテナ (IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 60, pp. 3043-3054 (2012))
- ④アナログ信号処理用多層基板遅延素子 (IEEE Microwave Wireless Comp. Lett., 22, pp. 1-3 (2012))
- ⑤積層型 CRLH 伝送線路 (電気学会論文誌 C, 132, pp. 1310-1316 (2012))
- ⑥クレジットカード型金属対応 UHF 帯 RFID タグ (IEICE Electronics Express, 9, pp. 276-282 (2012))
- ⑦CRLH 零次共振器 (IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 59, pp. 612-618 (2011))
- ⑧導波管型 CRLH 零次共振器とアンテナ応用 (電子情報通信学会論文誌, J93-C, pp. 590-596 (2010))

【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

(1) メタマテリアル EIT

電磁誘起透明化現象(EIT)とはほぼ同じ周波数の電気双極子許容遷移と禁制遷移の結合による結合モードの間の透明化現象である。そこで電磁メタマテリアルでの実証のために分割リング共振器 2 つとアンテナ構造を近接させ、テラヘルツ時間領域分光より電磁誘起透明化による群遅延を観測した。

(2) TiO₂ 微小球メタマテリアル

簡便なメタマテリアル構築のために、テラヘルツ領域で高屈折率低損失の TiO₂ 微小球を金属メッシュ中に 2 次元に周期的に配置させ、電気-磁気結合による 2 次元の負の屈折率メタマテリアルを実現した。

(3) バビネの定理

構造共鳴を利用したメタマテリアルは本質的に狭帯域だが、自己補対金属構造では広帯域で応答する。チェッカーボード構造は最も単純な自己補対構造の一つで、印刷技術を用いて金属正方形同志のつながりを制御すると、チェッカーボードを構成する金属正方形が接触/非接触の近傍で複素透過率が劇的に変化する様子を観測した。さらに金属チェッカーボード構造を電子線リソグラフによって精密に制御し、波長の1/1000の程度の構造変化で、相補的なスペクトルの巨大な変化を観測した。

(4) メタマテリアル波長板

平行平板導波路を基にした人工媒質は導波路の表面構造を制御することによって導波路モード間の位相速度を制御することができる。そこで化学エッチング技術を用いて実際に人工媒質を作成し構築し、THzの領域で1オクターブ近くの帯域で動作するアクロマート $\lambda/4$ 板を構築し、製品化した。

(5) スミス-パーセルテラヘルツ波放射

金属回折格子を電子バンチが通過するときに電磁波が発生するスミス-パーセル効果は、自由電子レーザー開発での研究がなされているが、これは表面微細構造を有するメタ表面（デザイナー表面と）で存在する疑似表面プラズモンポラリトン（Spoof SPP）と本質的に同じである。そこで 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し、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い、逆ドップラー効果、逆チェレンコフ効果との対応について議論した。

(6) SIJ メタマテリアル

超微細インクジェット（Super-fine ink-jet, SIJ）工法は金属細線の2次元パターンニングだけでなく、3次元的な金属細線の配置が可能である。そこで磁場ベクトルがU字構造共振器を貫く3次元THzメタマテリアルを構築し、さらに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からのテラヘルツ波放射を実証した。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メタ原子の固有モードに起因して大きく変化する。特に卍型メタアトム光伝導アンテナにおいて顕著な特性が発現することを見出した。

(7) 3D メタマテリアル:

3次元メタマテリアルの負の屈折率に不可欠な巨大磁氣的応答の発現には基板上の分割リング共振器が最も有力である。そこで透明なプラスチックシート上に2次元の分割リング共振器を構築し、この2次元メタシートを積層させた構造を構築し、実験および理論の両面で磁氣応答に関する研究を行った。

【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

主な研究成果は以下の通りである

(1) 自己補対メタ表面の周波数無依存応答

拡張したバビネの原理をメタ表面に適用することで、特定の条件（自己補対条件）で周波数によらない電磁波応答が得られることを理論的に示した。そして、右図のようなメタ表面を作成し周波数無依存な電磁波応答を示すことを実証した。

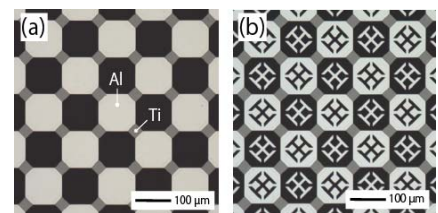


図7 自己補対メタ表面

(2) 結合共振器型メタマテリアルによる電磁波の保存および再生と第2次高調波の高効率発生

可変容量素子を導入したメタマテリアルで電磁誘起透明化(EIT)効果を変調する方法を考案し、電磁波の保存と再生を初めて実現した。これとは別に、非線形効果で共振器結合を実現する方法を考案し、第2次高調波発生の高効率化にも成功している。

(3) 気体プラズマを導入したメタマテリアル

負屈折率体可変性を実証する実験においては、透磁率制御を金属細線の2重らせん構造を用いて行い、屈折率が-2から正の値にまで連続的に変化することを確認した。大電力マイクロ波を用いる非線形性に関わる実験においては、マイクロ波電力が一定の閾値を迎えるとプラズマ生成が一気に進行して負の誘電率値にまで達する非線形分岐現象が観測された。また、同系で2倍高調波発生の確認にも成功している。

(4) 遺伝的アルゴリズムによるメタマテリアルの最適化

メタ表面における反射位相や、伝送線路および導波管の位相定数を遺伝的アルゴリズムによって最適化することに成功した。偏光回転の抑制や隣接セルの影響なども検討し、十分な性能を得ている。

(5) メタマテリアルの回路モデルに関する研究

導体球と導体線を基本要素とするメタマテリアルを放射損を含めて正確に回路化する手法を開発し、共振モードおよび周波数の解析に有効であることを示した。

【A02】

【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

- (1) Au 薄膜にサブ波長の孔がランダムに開いたナノポーラスゴールド (NPG) を作成し、レーザ光を斜め入射して得られる光起電力の実験を行なった。周期的な構造でなくても、明確な偏光依存性があること、s-偏光と p-偏光で異なる波長依存性を示すことを見出した。Optics Express 23, 823-832 (2015)
周期構造をもった金属薄膜に生じる微視的な光電場の構造を利用した光ナノリソグラフィを提案し、電磁場数値計算と比較して実証した。Optics Express 22, 18748-18756 (2014).
- (2) 準周期金属誘電体多層膜メタマテリアル上に配置した量子ドットの発光寿命が有意に短くなる現象を見出し、電磁場モードの空間構造による変調に基づく理論と比較して解析した。Physical Review B 90, 075146: 1-6 (2014)
- (3) フェライトに銅線コイルを巻いたメタ分子を用いたマイクロ波領域での磁気カイラル効果の測定を行った。その結果、200mT の静磁場を加えると、共鳴的光学活性の周波数 (約 10GHz) で、表と裏の屈折率差にして、10 の-3 乗から-2 乗という巨大な磁気カイラル効果が得られた。(計画研究エの富田・澤田と計画研究アの上田の共同研究) Physical Review Letters 113, 235501: 1-5 (2014).
- (4) インクジェットプリンターで作製した光伝導アンテナからのテラヘルツ放射の偏光依存性を測定し、電磁場シミュレーションと比較することにより、放射特性を解析した。(計画研究イの萩行グループとの共同研究) APPLIED PHYSICS LETTERS 103, 111106:1-4 (2013).
- (5) ベリー位相を用いて X 線の伝搬を制御する理論を構築し、実験で検証した。Physical Review Letters 110, 057402 (2013).
- (6) 垂直入射で回折が生じない長波長においても、構造の非対称性によって光整流が生じることを実証した。Optics Letters 37, 2793-2795 (2012).
- (7) 光の運動量を表面プラズモンに移行することにより発生する光起電力を実証した。Optics Express 20, 1561-1574 (2012).
- (8) らせん構造をもつタバコモザイクウィルスに直径 5nm の金ナノ粒子を付着させたメタ分子を作製し、可視光領域で (モザイクウィルスが持つものと逆の) 負の円偏光二色性を生じることを見出した。Physica status solidi (c) 9, 2529-2532 (2012).
- (9) 高速周期多重極法を用いて、ダブルフィッシュネットの構造の負の屈折率を最適化した。Progress in Electromagnetics Research 127, 49-64 (2012).
- (10) 2次元フォトニック結晶における光トルネードとカイラルエッジ状態を理論的に解析した。Proc. Of SICE Ann. Conf. 2012, 1050-1055 (2012).

【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

- (1) トップダウン的手法である電子ビーム描画法と金属の残留応力を用いて自己組織的に構造が形成されるボトムアップ的手法とを組み合わせた全く新しい 3次元金属加工技術を開発し、研究目的に掲げた mm 角の 3次元メタマテリアルの作製に成功した。そして、作製したメタマテリアルが真空の屈折率よりも低い 0.35 という特異な屈折率を示す事を確認した。(Adv. Opt. Mater. 3, pp. 44-48 (2015))
- (2) 光合成によって増殖する螺旋藻類スピルリナをテンプレートにして、それを金属化することでマイクロメートルスケールの金属コイルを大量に作製する手法の開発に成功した。この実験では、計画班内のチーム連携 (田中-彌田) に加えて、計画班間 (彌田-萩行) の連携を行い、作製した金属マイクロコイルのテラヘルツ波に対する応答特性を明かにした。(Scientific Reports, 4, 1-7 (2014))
- (3) レーザーを用いた 3次元金属加工技術の開発においては、金属錯イオンにフェムト秒レーザーを集光照射して、イオンを直接金属に還元することで、三次元的な金属構造を自由に加工できる二光子還元法を開発した。そして、波長 800nm の近赤外レーザーを用いながらも線幅 100nm 程度にまで加工分

解能を高める事に成功した。(IEEE JSTQE 19, 3, 4700110 (2013).)

- (4) 磁場を用いて動的に金属微粒子を配列させる技術の開発にも成功し、外部磁場の On-Off で、メタマテリアル構造を形成したり破壊したりすることができる、全く新しい自己組織化手法を開発した。(Applied Physics Letters **100**, 181106 (2012))
- (5) DNA などの生体分子をテンプレートとして利用し、化学的な手法で合成した金ナノ微粒子を三角形構造に接続することでメタマテリアルを構成する共振器構造を作製する手法を開発し、大量の共振器構造を自己組織的に加工する技術を開発した。(J. Phys. Chem. C **116**, 15028-15033 (2012))
- (6) ブロックコポリマーのナノ層分離構造を用いてウェファースケールの大面積基板表面に金属ナノ微粒子の集積構造体を作り出す技術に成功した。班間(藤川-岡本)の連携を有効に活用し、試作した構造の偏光特性やスペクトル特性を明かにした。(Nanotechnology, **23**, 505502/1-6 (2012))
- (7) 独自に開発したナノコーティングリソグラフィ法をメタマテリアルの加工に応用し、金ナノフィンの大面積作製を行った。この研究においても班内連携(藤川-田中)により作製した構造の近赤外~可視域における光学応答特性を明らかにし、共振波長の光を金属構造内にトラップできることを確かめた。(Nano Lett., **11**, pp. 8-15, Jan. (2011))

【計画研究力】プラズモン共鳴型光波メタマテリアル表面の創製技術の開発

(1) CO₂ センサの消費電力低減: CO₂ センサは熱放射光源と 2 波長検出器から構成されているが、光源の発する幅広い波長の赤外光の内、ごく一部の光しか利用しないため、効率が低い。本研究では、CO₂ 濃度計測に必要な波長 4.26 μm と 3.95 μm の赤外光をほぼ完全黒体放射し、その他の波長の放射を極力抑制したメタ表面熱放射光源を UV ナノインプリント法にて作製した。実際に CO₂ センサに応用し、測定時の光源電力の 34% の低減を実証した。(Miyazaki, Sci. Technol. Adv. Mater, 2015)

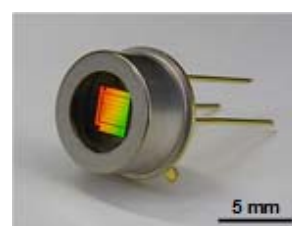


図8 ナノインプリント法により作製した CO₂ センサ用メタ表面熱放射光源

(2) 光ディラックコーン: フォトニック結晶やメタマテリアルなどの周期的な構造物のブリルアンゾーンの原点に、直線的で等方的な分散関係(光ディラックコーン)を形成する方法を発見した。k・P 摂動法と群論を組合せた理論解析で、モードの偶然縮退により光ディラックコーンを生成する対称性の組合せを解明した。ディラック点で実効屈折率がゼロになるので、種々の新規な光学現象の実現が期待できる。メタ表面のディラック点では、電磁波の進行方向が入射光の偏光で制御できることを見出した。外部光による励起過程をグリーン関数法で定式化することにより、ディラックコーンと外部光の結合強度と選択則、および、スラブ内での伝搬特性を完全に解明した。上述の手法を周期変調された 2 次元量子井戸の電子準位の解析に拡張し、伝導電子のサブバンドにディラックコーンが形成できることを見出した。これにより、極端に小さな有効質量や大きな易動度等、高性能な電子デバイスの開発につながる特異な物性の実現が期待される。(Sakoda, Opt. Express, 2012; Phys. Rev. A, 2014)

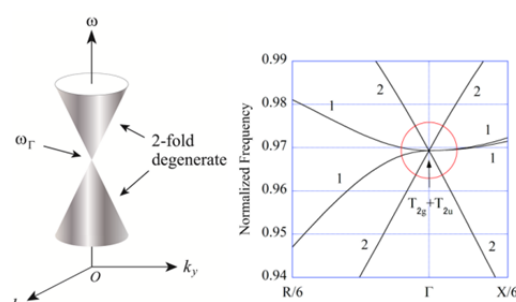


図9 (左) C_{6v} 対称なフォトニック結晶に生じる 2 重ディラックコーン、(右) O_h 対称な場合の数値計算による実証。

(3) ナノインプリント法: 将来の極微小・超高速・極低エネルギー光信号処理素子として、プラズモニクス、メタマテリアル等ナノフォトニクス素子の作製には極微細・大面積加工が不可欠であり、ナノインプリント技術が期待されている。今回、プラズモン・カラーフィルタにこの技術を活用し、従来の電子線描画と比較して大面積を短時間プロセスで実現し、大幅なスループット改善を実現した。最大 10mm 角の色純度に優れた RGB カラーフィルタを実現し、プラズモン現象を利用した吸収型でないカラーフィルタのため高出力光源にも対応可能であることを実証した。



図10 カラーフィルタ

つぎに、公募研究について計画研究を補完するような研究例を記す。

【A01】

「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)

本研究ではメタマテリアルによって構成される左手系媒質(LHM)と様々な光学媒質との界面に存在する表面波の特性を理論的に解析し、それをもとに新しい原理のテラヘルツデバイスを提案することを目的として研究を行い、以下の結果を得た。

①異方性負誘電率および異方性負透磁率をもつような一般的なLHMと誘電体との界面における表面波について、TM(Transverse Magneticfield)波またはTE(Transverse Electricfield)波に対する分散関係式を導出し、その解析解を求め、それぞれ表面波が存在するための条件式を解析的に導出した。②典型的なメタ原子である分割リング共振器と細線を用いた具体的なメタ表面を提案した。TM波またはTE波のどちらか一方の表面波が伝搬し得る自明なメタ表面を積層して方形メタマテリアル導波路とする構造を提案した。また、このようなメタマテリアルを平面プロセスで実現できる積層構造を提案した。

【A02】

「MEMS駆動型電磁誘起透明化メタマテリアルによる動的光制御」(金森義明)

①波長800nm帯(生体の窓)で電磁誘起透明化(EIT)メタマテリアルを実現。②可視光(波長(青)462、(緑)514、(赤)647nm)でのEIT応答の観測に成功。③シリコン誘電体メタマテリアルの導波モード共鳴を利用し、 $\pm 50^\circ$ の許容入射角を持つ反射型三原色フィルタを実現。④光領域において、シンプルな構造でFano共鳴を発現するAsymmetric double bars(ADB)メタマテリアルの提案と実証。⑤ADBメタマテリアルのユニットセルの配列を変化させることによってFano共鳴のQ値向上を実証。(以上、2014年度)⑥MEMS制御によるインダクタンス可変スプリットリング共振器構造およびMEMS制御によるキャパシタンス可変スプリットリング共振器構造を提案し、数値解析により光スペクトルの制御性を解明(2013年度)。

「MEMS駆動可変構造による光メタマテリアルの高機能化」(金森義明)

①Si細線光導波路とメタマテリアル減衰器構造の高精度アライメント技術で光通信用超小型波長選択減衰器を実現(2012年度)。

「可溶性光メタマテリアル」(梶川浩太郎)

本研究の目的は、液体に可溶性光マテリアルの設計、作製、評価である。ここで「可溶」とは、熱力学的な溶解ではなく、溶液中に光メタマテリアルが安定に分散されている状態を指す。この方法は、よく規定された構造で、かつ、異方性を持たないメタマテリアルが作製できる。研究の成果は以下の通りである。

①離散双極子近似(DDA)およびFDTDを用いた数値計算により任意の形状のMIM構造の光学特性を設計できるようにした。②2種類の試料の作成方法を確立。1つ目の方法では、NaCl基板上に格子状のマスクを用いて正方形のMIM構造を作製し、基板を水に溶解することにより分散を達成。2つ目の方法では、ガラス基板上にMIM構造を構築し、超音波による脱離で水中に分散を達成。

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ程度）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。また、別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。

まず、領域全体で取り組んだ成果について記し、次に計画研究、公募研究の順に記す。

【領域ホームページ】 <http://www.metamate.net/>

【図書】

新学術領域のメンバーで、

- (1) Metamaterials Handbook, Theory and Phenomena of Metamaterials (CRC Press, 2009, 974 ページ)、
 - (2) Metamaterials Handbook, Application of Metamaterials (CRC Press, 2009, 762 ページ)
- を翻訳し、講談社サイエンティフィック社から出版予定。現在グラブリ校正の段階で、2015 年中には刊行の見込み。(監訳：萩行、真田、石原)

【主催シンポジウム】

「4. 審査結果の所見及び中間評価で指摘を受けた事項への対応状況」でも述べたように、①電磁メタマテリアル講演会と②日韓メタマテリアルフォーラムを各 5 回開催した。

【A01】

【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

【論文】 (計 33 件)

- [1] (解説論文) 真田篤志, メタマテリアルの新展開, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, 33, 夏号, pp. 6-11 (2015)
- [2] (解説論文) 宇野 亨, メタマテリアル設計解析のための電磁界解析法, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, 33, 夏号, pp. 12-19 (2015)
- [3] ◎ *S. Tomita, K. Sawada, A. Porokhnyuk, and T. Ueda, Direct observation of magnetochiral effects through a single metamolecule in microwave regions, Phys. Rev. Lett., 113, 235501 (2014)
- [4] *Porokhnyuk Andrey, Tetsuya Ueda, Yuichi Kado, Tatsuo Itoh, Phase-constant-nonreciprocal composite right/left-handed metamaterials based on coplanar waveguides, J. Appl. Phys., 115, 17E519 (2014)
- [5] (招待論文) *Toru Uno, Electromagnetic Modeling of Metamaterials, IEICE Trans. Commun., vol.E96-B, no.10, pp.2340-2347 (2013)
- [6] (解説記事) *真田篤志, 座標変換とクローキング, Journal of IEICE, 96, pp. 46-51 (2013)
- [7] *T. Ueda, S. Yamamoto, Y. Kado, and T. Itoh, Pseudo-traveling wave resonator with magnetically tunable phase gradient of fields and its applications to beam steering antennas, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 60, pp. 3043-3054 (2012)
- [8] *Y. Horii, S. Gupta, B. Nikfal, and C. Caloz, Multilayer Broadside-Coupled Dispersive Delay Structures for Analog Signal Processing, IEEE Microwave Wireless Comp. Lett., 22, pp. 1-3 (2012)
- [9] *Yujiro Kushiyama, Takuji Arima and Toru Uno, Experimental Verification of Spoof Surface Plasmons in Wire Metamaterials, Optical Express, 20, pp. 18238-18247 (2012)
- [10] ◎ C. Iida, M. Sato, *M. Nakayama, A. Sanada, Electrodeposition of Cu₂O Nanopyramids using an Anodic Oxide Template, Int'l J. Electrochemical Science, 6, 4730-4736 (2011)

その他 23 件

【主催シンポジウム】 (計 6 件)

- [1] ワークショップ「メタマテリアルアンテナ」, Microwave Workshop and Exhibition 2014, パシフィコ横浜 (横浜市), 2014 年 12 月 12 日
- [2] オーガナイズドセッション「電磁メタマテリアルのアンテナ・マイクロ波応用」, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会/マイクロ波研究会, 東京工業大学 (東京都目黒区), 2014 年 9 月 18-19 日
- [3] シンポジウム「周期構造を利用した電磁メタマテリアルのアンテナ・マイクロ波応用」, 2014 年電子情報通信学会総合大会, 徳島大学 (徳島市), 2014 年 9 月 23-26 日

- [4] ワークショップ「変換電磁気学・メタマテリアル」, Microwave Workshop and Exhibition 2013, パシフィコ横浜 (横浜市), 2013 年 11 月 28 日
- [5] オーガナイズドセッション「メタマテリアル」, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, 横須賀市勤労福祉会館 (横須賀市), 2013 年 8 月 29-30 日
- [6] ワークショップ「メタマテリアルのための設計、モデリング、シミュレーション、測定技法」, Microwave Workshop and Exhibition 2011, パシフィコ横浜 (横浜市), 2014 年 12 月

【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

【論文】(計 57 件、すべて査読有り)

- [1] *M. Nagai, N. Mukai, Y. Minowa, M. Ashida, T. Suzuki, J. Takayanagi, and H. Ohtake, "Achromatic wave plate in THz frequency region based on parallel metal plate waveguides with a pillar array," *Optics Express*, **23**, (4), 4641-4649 (2015).
- [2] F. Miyamaru, H. Morita, Y. Nishiyama, T. Nishida, T. Nakanishi, M. Kitano, and M. W. Takeda, "Ultrafast optical control of group delay of narrow-band terahertz waves", *Scientific Reports* **4**, 4346 (2014).
- [3] *M. Nagai N. Mukai, Y. Minowa, M. Ashida, J. Takayanagi and H. Ohtake, "Achromatic THz wave plate composed of stacked parallel metal plates", *Optics Letters*, **39**, 146-149 (2014). (press release あり)
- [4] D. Li, Y. Wang, M. Hangyo, Y. Wei, Z. Yang, and S. Miyamoto, "Cherenkov radiation oscillator without reflectors" *Applied Physics Letters* **104**, 194102 (2014).
- [5] K. Takano, F. Miyamaru, K. Akiyama, H. Miyazaki, M. W. Takeda, Y. Abe, Y. Tokuda, H. Ito, M. Hangyo, "Crossover from capacitive to inductive electromagnetic responses in near self-complementary metallic checkerboard patterns", *Optics Express*, **22**, 24787-24795, (2014).
- [6] T. Sato, Y. Jimba, and H. Miyazaki, "Surface Electromagnetic Waves of Chiral Metamaterials Interfaces" *Transaction of the Materials Research Society of Japan*, **38**, (3), 493-496 (2013).
- [7] H. Suo, K. Takano, S. Ohno, H. Kurosawa, K. Nakayama, T. Ishihara, and M. Hangyo, "Polarization property of terahertz wave emission from gammadion-type photoconductive antennas" *Appl. Phys. Lett.* **103**, 111106-1-4 (2013).
- [8] K. Takano, Y. Yakiyama, K. Shibuya, K. Izumi, H. Miyazaki, Y. Jimba, F. Miyamaru, H. Kitahara, M. Hangyo, "Fabrication and performance of TiO₂-ceramic-based metamaterials for terahertz frequency range" *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **3**, 812-819 (2013).
- [9] *F. Miyamaru, M. Kamijyo, N. Hanaoka, and M. W. Takeda, "Controlling extraordinary transmission characteristics of metal hole arrays with spoof surface plasmons", *Applied Physics Letters* **100**, 081112 (2012).
- [10] K. Takano, H. Yokoyama, A. Ichii, I. Iwamoto, and M. Hangyo, "Wire-grid polarizer sheet in the terahertz region fabricated by nanoimprint technology", *Optics Letters* **36**, 2665-2667 (2011).
- [11] *X. Xiao, W. Jinbo, F. Miyamaru, M. Zhang, S. Li, M W. Takeda, W. Wen, and P. Sheng, "Fano effect of metamaterial resonance in terahertz extraordinary transmission", *Applied Physics Letters* **98**, 011911 (2011).
- [12] K. Yatsugi, N. Matsumoto, *T. Nagashima, and M. Hangyo, "Transport properties of free carriers in semiconductors studied by terahertz time-domain magneto-optical ellipsometry", *Applied Physics Letters* **98**, 212108-1-3 (2011).
- [13] *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).
- [14] *K. Akiyama, K. Takano, Y. Abe, Y. Tokuda, and M. Hangyo, "Optical transmission anomalies in a double-layered metallic slit array", *Optics Express* **18**, 17876-17882 (2010).
- [15] F. Miyamaru, S. Kubota, K. Taima, K. Takano, M. Hangyo, and M W. Takeda, "Three-dimensional bulk metamaterials operating in the terahertz range," *Appl. Phys. Lett.* **96**, 081105-1-3 (2010).

他 42 件

【書籍】(全 7 件)

- [1] 堀越智、萩行正憲、田中拓男、高野恵介、上田哲也著、*図解 メタマテリアル -常識を超えた次世代材料-*、(日刊工業新聞社、2013 年 11 月)
- [2] 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 章プリン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)

他 5 件

【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

【論文】(計 30 件)

- [1] *Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, "Frequency-independent response of self-complementary checkerboard screens," Phys. Rev. Lett. Vol. 114, p. 237401 (2015). 査読有
- [2] *Y. Tamayama, "Brewster effect in metafilms composed of bi-anisotropic split-ring resonators," Opt. Lett. Vol. 40, pp. 1382-1385 (2015). 査読有
- [3] *Y. Tamayama, K. Yasui, T. Nakanishi, and M. Kitano, "Electromagnetically induced transparency like transmission in a metamaterial composed of cut-wire pairs with indirect coupling," Phys. Rev. B, Vol. 89, p. 075120 (2014). 査読有
- [4] *Y. Mukainoge H. Deguchi, M. Tsuji, "An optimized design method of composite right/left handed transmission lines considering higher-order mode interaction by genetic algorithm," IEEE International Workshop on Electromagnetics Proceedings, Vol. 1, pp. 78-79 (2014). 査読有
- [5] *T. Nakanishi, T. Otani, Y. Tamayama, and M. Kitano, "Storage of electromagnetic waves in a metamaterial that mimics electromagnetically induced transparency," Phys. Rev. B, Vol. 87, p. 161110 (2013). 査読有
- [6] *T. Nakanishi, Y. Tamayama, and M. Kitano, "Efficient second harmonic generation in a metamaterial with two resonant modes coupled through two varactor diodes," Appl. Phys. Lett. Vol. 100, p. 044103 (2012). 査読有
- [7] *O. Sakai and K. Tachibana, "Plasmas as metamaterials: a review," Plasma Sources Science and Technology, Vol. 21, pp. 013001-1-18 (2012). 査読有
- [8] *Y. Aoki, H. Deguchi, M. Tsuji, "Reflectarray with arbitrarily-shaped conductive elements optimized by genetic algorithm," IEEE/AP-S Antennas and Propagation Symposium Proceedings, Vol. 1, pp. 960-963 (2011). 査読有
- [9] *O. Sakai, "Transition between positive and negative permittivity in field-dependent metamaterial," Journal of Applied Physics, Vol. 109, pp. 084914-1-6 (2011). 査読有
- [10] *O. Sakai, T. Shimomura and K. Tachibana, "Negative refractive index designed in a periodic composite of lossy microplasmas and microresonators," Physics of Plasmas, Vol. 17, 2010, pp. 123504-1-9 (2010). 査読有

他 20 件

【図書】(計 6 件)

- [1] M. Kitano, Intech, Trends in Electromagnetism - From Fundamentals to Applications, pp. 21-44 (2012).

他 5 件

【A02】

【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

【論文】(計 24 件)

- [1] Marjan Akbari, Masaru Onoda and *Teruya Ishihara, "Photo-induced voltage in nano-porous gold thin film", Optics Express 23, 823-832 (2015). 査読有
- [2] K. Kusaka, H. Kurosawa, *S. Ohno, Y. Sakaki, K. Nakayama, Y. Moritake, and T. Ishihara, "Waveguide-mode interference lithography technique for high contrast subwavelength structures in the visible region," Optics Express 22, 18748-18756 (2014). 査読有
- [3] Yuto Moritake, *Kazuyuki Nakayama, Toshihiro Suzuki, Hiroyuki Kurosawa, Toshiyuki Kodama, Satoshi Tomita, Hisao Yanagi, Teruya Ishihara, "Lifetime reduction of a quantum emitter with quasi-periodic metamaterials," Physical Review B 90, 075146: 1-6 (2014). 査読有
- [4] *S. Tomita, K. Sawada, A. Porokhnyuk, T. Ueda, "Direct observation of magnetochiral effects through a single metamolecule in microwave regions," Phys. Rev. Lett. 113, 235501:1-5 (2014). 査読有
- [5] H. Suo, K. Takano, S. Ohno, H. Kurosawa, K. Nakayama, *T. Ishihara and M. Hangyo, "Polarization property of terahertz wave emission from gammadion-type photoconductive antennas," APPLIED PHYSICS LETTERS 103, 111106:1-4 (2013). 査読有
- [6] 新納和樹, 西村直志, "Maxwell 方程式に対する PMCHWT 定式化における Hdiv 内積を用いた離散化について," 計算数理工学論文集 13, 79-84 (2013). 査読有
- [7] *S. Tomita, Y. Kosaka, H. Yanagi and K. Sawada, "Chiral meta-interface: Polarity reversal of ellipticity through double layers consisting of transparent chiral and absorptive achiral media," Phys. Rev. B 87, 041404(R) (2013). 査読有

- [8] *M. Onoda, "Implementation of Unitary Algorithm in the Analysis of Quantum Dynamics at the Interface between a Topological Insulator and a Conductor," Proc. Of SICE Ann. Conf. 2012, 376-381 (2012). 査読有
- [9] H. Kurosawa and *T. Ishihara, "Surface plasmon drag effect in a dielectrically modulated metallic thin film," Optics Express 20, 1561-1574 (2012). 査読有
- [10] M. Kobayashi, *S. Tomita, K. Sawada, K. Shiba and H. Yanagi, "Chiral meta-molecules consisting of gold nanoparticles and genetically engineered tobacco mosaic virus," Physica status solidi (c) 9, 2529-2532 (2012). 査読有
- [11] 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). 査読有

他 13 件

【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

【論文】(計 36 報、すべて査読有り)

- [1] C-C. Chen, A. Ishikawa, Y-H. Tang, M-H. Shiao, D-P. Tsai, and T. Tanaka, "Uniaxial-isotropic Metamaterials by Three-dimensional Split-Ring Resonators," Adv. Opt. Mater. **3**, pp. 44-48 (2015). DOI: 10.1002/adom.201400316.
- [2] K. Kamata, Z. Piao, S. Suzuki, T. Fujimori, W. Tajiri, K. Nagai, T. Iyoda, A. Yamada, T. Hayakawa, M. Ishiwara, S. Horaguchi, A. Belay, T. Tanaka, K. Takano, and M. Hangyo, "Spirulina-Templated Metal Microcoils with Controlled Helical Structures for THz Electromagnetic Responses", Scientific Reports, **4**, 1-7 (2014). DOI:10.1038/srep04919.
- [3] Y. Lee, E. Maeda, Y.-L. Ho, S. Fujikawa, and J.-J. Delaunay, "High sensitivity refractive index sensing with strong light confinement in high-aspect-ratio U-cavity arrays.," Sensors Actuators, B Chem., **202**, pp. 137-143, (2014). DOI: 10.1088/0957-4484/23/5/0505502
- [4] T. Amemiya, S. Arai, T. Mizumoto, Y. Shoji, T. Tanaka, A. Ishikawa, M. Tanaka, and P. Hai, "Three-dimensional Nanostructuring in YIG Ferrite with Femtosecond Laser," Opt. Lett. **39**, pp. 212-215 (2013). DOI: dx.doi.org/10.1364/OL.39.000212.
- [5] A. Ishikawa and T. Tanaka, "Plasmon Hybridization in Graphene Metamaterials," Appl. Phys. Lett. **102**, 253110 (2013). DOI: 10.1063/1.4812813.
- [6] R. W-Tamaki, A. Ishikawa, and T. Tanaka, "Blue shift of plasmonic resonance induced by nanometer scale anisotropy of chemically synthesized gold nanospheres," Appl. Phys. Lett. **102**, 43110 (2013). DOI: 10.1063/1.4790291.
- [7] S. Hadano, H. Handa, K. Nagai, T. Iyoda, J-Z. Li, and S. Watanabe, "Surface-enhanced Raman Scattering (SERS) Effect of Hexagonally Arranged Gold Nanoparticle Array with 29-nm Particles and 23-nm Gaps Using Liquid-crystalline Block-copolymer Template", Chem. Lett. **42**, 71-73 (2013). DOI:10.1246/cl.2013.71
- [8] N. Yamashita, H. Komiyama, Y. Zhao, M. Komura, T. Iyoda, and K. Nagai, "Hexagonally Arrayed 17 nm Interpenetrating and Continuous Biphasic Structure via Block-Copolymer-Templating Process", Jpn. J. Appl. Phys., **51**, 076704 (2012). DOI: 10.1143/JJAP.51.076704
- [9] E. Maeda, Y. Lee, Y. Kobayashi, A. Taino, M. Koizumi, S. Fujikawa, and J.-J. Delaunay, "Sensitivity to refractive index of high-aspect-ratio nanofins with optical vortex.," Nanotechnology, **23**, pp. 505502/1-6, (2012). DOI:10.1088/0957-4484/23/5/0505502
- [10] K. Aoki, K. Furusawa, and T. Tanaka, "Magnetic assembly of gold core-shell necklace resonators," Applied Physics Letters **100**, 181106 (2012). DOI: 10.1063/1.4706254.
- [11] T. Tanaka, "Two-photon Recording and Plasmon-Enhanced Read-Out of Three-Dimensional Optical Disk with Ten Recording Layers," Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 902 (2011). DOI: 10.1143/JJAP.50.09MG02.
- [12] K. Kamata, S. Suzuki, M. Ohtsuka, M. Nakagawa, T. Iyoda, and A. Yamada, "Fabrication of Left-Handed Metal Microcoil from Spiral Vessel of Vascular Plant", Adv. Mater., **23**, 5509-5513, (2011). DOI: 10.1002/adma.201103605
- [13] T. Yamamoto, T. Kimura, M. Komura, Y. Suzuki, T. Iyoda, S. Asaoka, and H. Nakanishi, "Block Copolymer Permeable Membrane with Visualized High-Density Straight Channels of Poly(ethylene oxide)", Adv. Funct. Mater., **21**, 918-926 (2011). DOI: 10.1002/adfm.201002069
- [14] W. Kubo and S. Fujikawa, "Au double nanopillars with nanogap for plasmonic sensor.," Nano Lett., **11**, pp. 8-15, Jan. (2011). DOI: 10.1021/nl100787b.

他 22 件

学会発表 (255 件、うち招待講演 113 件)、図書 (12 件)、特許出願 (8 件)、特許権利化 (2 件)

【計画研究カ】 プラズモン共鳴型光波メタマテリアル表面の創製技術の開発

【論文】 (計 41 件)

- [1] *B. Choi, M. Iwanaga, H. T. Miyazaki, Y. Sugimoto, A. Ohtakea, and K. Sakoda, “Overcoming metal-induced fluorescence quenching on plasmo-photonic metasurfaces coated by a self-assembled monolayer,” Chem. Commun. (印刷中) .
- [2] *H. T. Miyazaki, T. Kasaya, H. Oosato, Y. Sugimoto, B. Choi, M. Iwanaga, and K. Sakoda, Ultraviolet-nanoimprinted packaged metasurface thermal emitters for infrared CO₂ sensing, Sci. Technol. Adv. Mater., 査読有, Vol.16, 2015, 035005/1-4. DOI: 10.1088/1468-6996/16/3/035005.
- [3] *M. Iwanaga and B. Choi, Heteroplasmon hybridization in stacked complementary plasmo-photonic crystals, Nano Letters, 査読有, Vol. 15, 2015, 1904–1910. DOI: 10.1021/nl054755d
- [4] *M. Iwanaga, B. Choi, H. T. Miyazaki, Y. Sugimoto, and K. Sakoda, Large-area resonance-tuned metasurfaces for on-demand enhanced spectroscopy, Journal of Nanomaterials, 査読有, Vol. 2015, 2015, 507656/1-7. DOI: 10.1155/2015/507656
- [5] *S-Q. Li, P. Guo, D. B. Buchholz, W. Zhou, Y. Hua, T. W. Odom, J. B. Ketterson, L. E. Ocola, K. Sakoda, R. P. H. Chang, Plasmonic -photonic mode coupling in indium-tin-oxide nanorod arrays, ACS Photonics, 査読有, 1 巻, 2014, 163-172. DOI: 10.1021/ph400038g
- [6] *B. Choi, M. Iwanaga, T. Ochiai, H. T. Miyazaki, Y. Sugimoto, and K. Sakoda, Subnanomolar fluorescent-molecule sensing by guided resonances on nanoimprinted silicon-on-insulator substrates, Applied Physics Letters 査読有, Vol. 105, 2014, 201106/1-5. DOI: 10.1063/1.4902424
- [7] *H. T. Miyazaki, T. Kasaya, M. Iwanaga, B. Choi, Y. Sugimoto, and K. Sakoda, Dual-band infrared metasurface thermal emitter for CO₂ sensing, Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol.105, 2014, 121107/1-4. DOI: 10.1063/1.4896545
- [8] *S-Q. Li, W. Zhou, D. B. Buchholz, J. B. Ketterson, L. E. Ocola, K. Sakoda, R. P. H. Chang, Ultra-sharp plasmonic resonances from monopole optical nanoantenna phased arrays, Appl. Phys. Lett., 査読有, 103 巻, 2014, 231101/1-5. DOI:10.1063/1.4881323
- [9] *K. Sakoda, Polarization-dependent continuous change in the propagation direction of Dirac-cone modes in photonic crystal slabs, Phys. Rev. A, 査読有, 90 巻, 2014, 013835/ 1-8. DOI: 10.1103/PhysRevA.90.013835
- [10] *B. Choi, M. Iwanaga, H. T. Miyazaki, K. Sakoda, and Y. Sugimoto, Photoluminescence-enhanced plasmonic substrates fabricated by nanoimprint lithography, Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS 査読有, Vol. 13, 2014, 023007/1-6. DOI: 10.1117/1.JMM.13.2.023007
- [11] *M. Iwanaga, First-Principle Analysis for Electromagnetic Eigen Modes in an Optical Metamaterial Slab, Progress in Electromagnetics Research 査読有, Vol. 132, 2014, 129–148. DOI: 10.2528/PIER12071202
- [12] *T. Itoh, Y. S. Yamamoto, H. Tamaru, V. Biju, N. Murase, Y. Ozaki, Excitation laser energy dependence of surface-enhanced fluorescence showing plasmon-induced ultrafast electronic dynamics in dye molecules, Phys. Rev. B, 査読有, 87 巻, 2013, 235408/1-6, DOI: 10.1103/PhysRevB.87.235408
- [13] ©*T. Matsui, T. Nomura, A. Miura, H. Fujikawa, N. Ikeda, D. Tsuya, H. T. Miyazaki, Y. Sugimoto, M. Ozaki, M. Hangyo, K. Asakawa, Wavefront control by stacked metal-dielectric hole array with variable hole shapes, Opt. Express, 査読有, 21 巻, 2013, 6153. DOI: 10.1364/OE.21.006153
- [14] *K. Sakoda, Proof of the universality of mode symmetries in creating photonic Dirac cones, Opt. Express, 査読有, 20 巻, 2012, 25181- 25194. DOI: 10.1364/OE.20.025181
- [15] *T. Okamoto, T. Otsuka, S. Sato, T. Fukuta, and M. Haraguchi, “Dependence of LC resonance wavelength on size of silver split-ring resonator fabricated by nanosphere lithography”, Optics Express, 査読有, Vol.20, 2012, 24059-24067. DOI: 10.1364/OE.20.024059

他 26 件

【書籍】 (計 5 件)

- [1] 杉本喜正、シーエムシー出版、メタマテリアル II、2012 年、230–239

他 4 件

【主催シンポジウム】

- [1] 特別セッション「Photonic Dirac Cone and Topological Photonic States」、META 2014、南洋理工大学 (シンガポール)、2014 年 5 月 23 日

【公募研究】 A01

【論文】 (計 13 件)

- [1] D. B. Hamal, *M. Higuchi, and K. Higuchi, “Calculation of Magnetic oscillations via the magnetic-field-containing relativistic tight-binding approximation method: Revisit of the de Haas-van Alphen effect”, Phys. Rev. B. **91**, 245101/1-9 (2015).
- [2] *K. Higuchi, D. B. Hamal, and M. Higuchi, “Relativistic tight-binding approximation method for materials immersed in a uniform magnetic field: Application to the crystalline silicon”, Phys. Rev. B. **91**, 075122/1-22 (2015).
- [3] Yuki Takebayashi, Takuya Konno, Shouhei Shimada, Fumiaki Miyamaru, John C. Young, Hideaki Kitahara, Keisuke Takano, Masanori Hangyo, and *Takehito Suzuki, “Focusing Effect Measurements of Artificial Dielectric Multilayer Lens with Metal Rectangular Chips for Terahertz Wave Band,” Applied Physics A, 査読有, vol. 115, no. 2, pp. 501-508, May 2014. DOI: 10.1007/s00339-013-8074-8
- [4] *Takehito Suzuki, Hiroki Yonamine, Takuya Konno, John C. Young, Keisuke Takano, and Masanori Hangyo, “Parallel Plate Lens with Metal Hole Array for Terahertz Wave Band,” Applied Physics A, 査読有, vol. 115, no. 2, pp. 403-408, May 2014. DOI: 10.1007/s00339-013-8073-9
- [5] *Takehito Suzuki, Hiroki Yonamine, Takuya Konno, John C. Young, Kotaro Murai, Fumiaki Miyamaru, Keisuke Takano, Hideaki Kitahara, and Masanori Hangyo, “Analysis and Design of Concave Lens with Metallic Slit Array for Terahertz Wave Band,” Applied Physics A, 査読有, vol. 115, no. 2, pp. 495-500, May 2014. DOI: 10.1007/s00339-013-8072-x
- [6] Tatsunosuke Matsui, Ryosuke Takagi, Keisuke Takano and Masanori Hangyo, “Mechanism of Optical Terahertz-Transmission Modulation in Organic/Inorganic Semiconductor Interface and Its Application to Active Metamaterials”, Opt. Lett. **38**, pp.4632-4635 (2013).
- [7] *K. Kan, J. Yang, A. Ogata, S. Sakakihara, T. Kondoh, K. Norizawa, I. Nozawa, T. Toigawa, Y. Yoshida, H. Kitahara, K. Takano, M. Hangyo, R. Kuroda, H. Toyokawa, “Radially polarized terahertz waves from a photoconductive antenna with microstructures”, Appl. Phys. Lett. **102**, 221118 (2013).
- [8] Relativistic tight-binding approximation method for materials immersed in the magnetic field, K. Higuchi, D. B. Hamal, K. Yamamoto and *M. Higuchi, Trans. Mater. Res. Soc. Jpn. **38**, 663-665 (2013).

他 5 件

【書籍】

- [1] 高原淳一 (共著)、アクティブ・プラズモニクス 3 章 (コロナ社、2013) .

【公募研究】 A02

【論文】 (計 56 件)

- [1] (Invited Paper) Yoshiaki Kanamori, Ryohei Hokari, and Kazuhiro Hane, MEMS for Plasmon Control of Optical Metamaterials, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol.21, no.4, (2015) 2701410(10pp).
- [2] 金森義明, 光領域で動作するメタマテリアルの作製 = 光メタマテリアルを用いた擬似電磁誘起透明化と光通信用減衰器 =, 光アライアンス, vol.26, no.3, (2015) 24-28.
- [3] *Masahiko Yoshino, Zhenxing Li, Motoki Terano: Theoretical and experimental study of metallic dot agglomeration induced by thermal dewetting, ASME Journal of Micro and Nano-Manufacturing, volume 3, Issue 2, 021004 (Jan 01, 2015), Paper No: JNMN-14-1055; doi: 10.1115/1.4029685
- [4] H. Okamoto, T. Narushima, Y. Nishiyama and K. Imura, Local optical responses of plasmon resonances visualised by near-field optical imaging, Phys. Chem. Chem. Phys. **17**, 6192-6206 (2015).
- [5] T. Uehara, S. Kubo, M. Nakagawa*, Reverse tone ultraviolet nanoimprint lithography with fluorescent UV-curable resins, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 54, 2015, 06FM02/1-6. DOI: 10.7567/JJAP.54.06FM02.
- [6] *T. Shimogaki, H. Kawahara, M. Higashihata, H. Ikenoue, D. Nakamura, Y. Nakata, T. Okada, Fabrication of ZnO crystals by UV-laser annealing on ZnO nanoparticles prepared by laser ablation method, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 9364, 2015, DOI: 10.1117/12.2078849.
- [7] Yuto Moritake, Yoshiaki Kanamori, and Kazuhiro Hane, Experimental demonstration of sharp Fano resonance in optical metamaterials composed of asymmetric double bars, Optics Letters, vol.39, no.13, (2014) 4057-4060.
- [8] R. Hata, N. Yokoshi, H. Ajiki and H. Ishihara, Up-Converted Luminescence of a Two-Level Molecule with Population Inversion, Journal of Physical Society of Japan., 査読有, Vol.83, 2014, 093401/1-4. DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.093401>.

- [9] Y. Osaka, N. Yokoshi, M. Nakatani and H. Ishihara, Enhanced up-conversion of entangled photons and quantum interference under localized field in nanostructures, Physical Review Letters., 査読有, Vol.112, 2014, 133601/1-5. DOI: 42.50.-p,42.65.Sf,33.80.Wz.
- [10] 金森義明, マイクロマシニングによる光メタマテリアルの製作, OPTRONICS, vol.33, no.392, (2014)65-69.
- [11] Ryohei Hokari, Yoshiaki Kanamori, and Kazuhiro Hane, Fabrication of planar metamaterials with sharp and strong electromagnetically induced transparency-like characteristics at wavelengths around 820 nm, Journal of the Optical Society of America B, vol.31, no.5, (2014) 1000-1005.
- [12] Ryohei Hokari, Yoshiaki Kanamori, and Kazuhiro Hane, Comparison of electromagnetically induced transparency between silver, gold, and aluminum metamaterials at visible wavelengths, Optics Express, vol.22, no.3, (2014) 3526-3537.
- [13] Yoshiaki KANAMORI, Toshikazu OZAKI, and Kazuhiro HANE, Fabrication of Ultrathin Color Filters for Three Primary Colors Using Guided-Mode Resonance in Silicon Subwavelength Gratings, Optical Review, vol.21, no.5, (2014) 723-727.
- [14] Yoshiaki Kanamori, Toshikazu Ozaki, and Kazuhiro Hane, Reflection color filters of the three primary colors with wide viewing angles using common-thickness silicon subwavelength gratings, Optics Express, vol.22, no.21, (2014) 25663-25672.
- [15] Takayuki Ueno, Motoki Terano, *Masahiko Yoshino: “Templated thermal dewetting process by utilizing nano plastic forming technology”, 11th International Conference on Technology of Plasticity, Procedia Engineering, 81, (2014), pp.1469-1474.

他 41 件

【書籍】(全 6 件)

- [1] 上原卓也、久保祥一、「ナノインプリントリソグラフィによる可視光応答メタマテリアル作製」、月刊オプトロニクス、 Vol. 33, No.8, 55-59, 2014
- [2] T. Ochiai、“透明マントは実現するか? ”、応用物理 第 82 卷 第 1 号 p.41 -45 (2013)
- [3] 金森義明、第 22 章 金属ナノ構造作製のためのインプリント技術、監修：石原照也、真田篤志、梶川浩太郎、「メタマテリアルⅡ」、株式会社シーエムシー出版、2012 年 6 月 1 日 第 1 刷発行、ISBN978-4-7813-0354-3 C3054.
- [4] 梶川浩太郎、岡本隆之、高原淳一、岡本晃一 アクティブプラズモニクス コロナ社 2013 5.23
他 2 件

【シンポジウム】(全 6 件)

- [1] (金森義明)平成 27 年電気学会全国大会 シンポジウム「光操作の限界を打ち破るメタマテリアル・プラズモニクスおよびフォトニック結晶の微細加工、デバイス応用」、東京都市大学 世田谷キャンパス、2015 年 3 月 24～26 日
- [2] (石原一) 第 25 回光物性研究会、2014 年 12 月 12 日 (金) -13 日 (土) 神戸大学
他 4 件

7. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

【研究組織と研究項目の関係】

研究組織と研究項目の関係を図4に示す。まず、メタマテリアルの関係する波長に従って、研究項目を2つに大別した。

(A01) 電磁波メタマテリアル（マイクロ波、THz波）

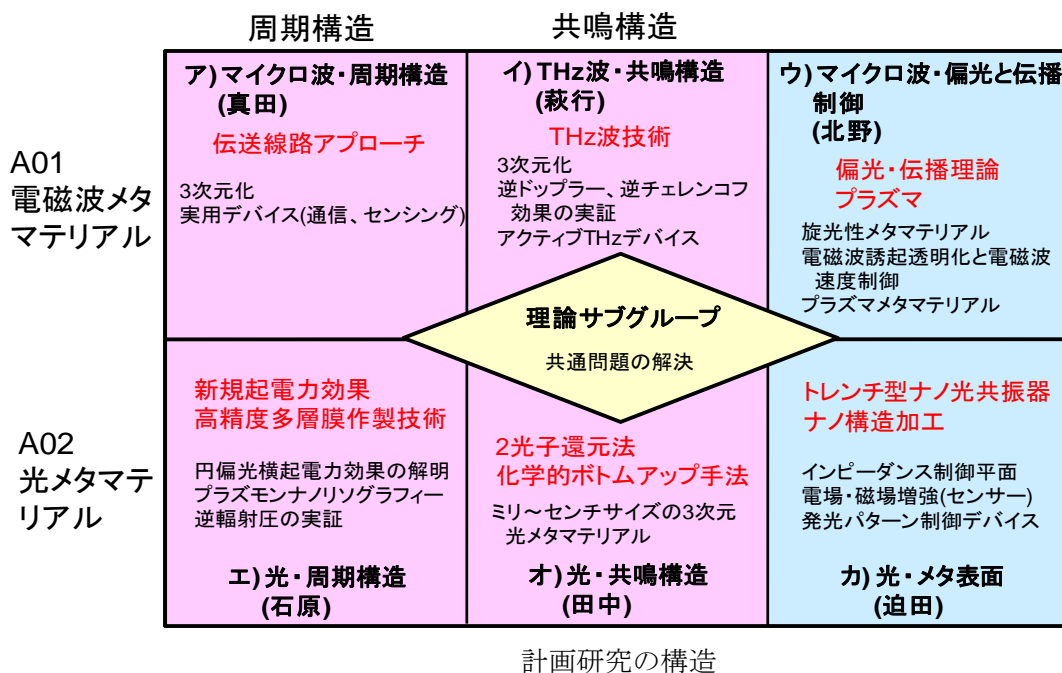
(A02) 光メタマテリアル（可視、赤外）

それぞれの研究項目について、主に周期構造を利用する研究課題（ア班、エ班）、主に共鳴構造を利用する研究課題（イ班、オ班）、および、その他（ウ班、カ班）の6つの計画研究班を設けた。研究項目A01とA02にはそれぞれ公募研究を募り、計画研究課題を補完、ないし、特徴的に発展させるような研究課題を選定するように努めた。

各計画研究班に所属する理論研究者を集めて理論サブグループを組織し、試料設計や特性予測で必要な数値解析法に関する情報交換などを実施した。「4. 審査結果の所見及び中間評価で指摘を受けた事項への対応状況」で述べたように、この新学術領域研究を通して格段に進んだ光ディラックコーンやトポロジカル光波状態の理論に関する研究会を開くなどして、研究の促進に努めた。また、この表には記されていないが、全ての研究課題に渡って「評価技術の標準化」に努めた。具体的には、すでに評価技術を確立しているグループに試料を送って特性を評価してもらい、自身の評価結果と照合することで評価技術の向上に努めた。さらに、全体会合を2~3回/年の頻度で開催して、各グループの研究成果や進捗状況を報告する等、相互の情報共有に努める中から数多くの共同研究が実現し、効率的・効果的に研究を遂行することができた。以下では、このような共同研究の例を箇条書きで紹介する。

【班間共同研究の例】

- [1] 計画研究ア班（真田） - 計画研究イ班（萩行）：萩行研のTDS（時間領域分光）装置を用いてテラヘルツ領域におけるCRLH媒質の材料評価を行った。
- [2] 計画研究ア班（全員） - 計画研究ウ班（全員）：合同班会議の開催。
- [3] 計画研究ア班（真田） - 計画研究ウ班（酒井）：プラズマメタマテリアルのマイクロ波応用に関する共同研究。
- [4] 計画研究ア班（上田・真田） - 計画研究エ班（富田・澤田）：金属螺旋構造と磁性材料を組み合わせたカイラルメタ分子の磁気カイラル効果のマイクロ波帯における観測に成功した。（Phys. Rev. Lett., 113, 235501 (2014)）



- [5] 計画研究ア班 (真田) - 計画研究オ班 (田中・彌田) : バイオテンプレート研究会等を通して技術交換を行った。
- [6] 計画研究ア班 (真田) - 計画研究カ班 (迫田) : ディラックコーンに関する技術交換から、マイクロ波領域における CRLH 人工構造によるディラックコーンメタ表面の実現につながった。
- [7] 計画研究ア班 (真田) - A02 公募研究 (中山) : 電気化学的手法により CRLH メタマテリアルを構成するための金属ナノピラミッドの作製に成功した. (Int'l J. Electrochemical Science, 6, 4730-4736 (2011))
- [8] 計画研究イ班 - 計画研究エ班 (石原) : 円型光伝導アンテナからの楕円偏光 THz 波放射
- [9] 計画研究イ班 - 計画研究オ班 (彌田) : バイオテンプレートメタマテリアル他
- [10] 計画研究イ班 - 計画研究ウ班 (北野) : 超高速群速度制御、二重ギャップ非対称 SRR
- [11] 計画研究イ班 - 計画研究エ班 (富田) : 立体カイラル構造からの円偏光 THz 波放射 (国際会議発表予定)
- [12] 計画研究イ班 - 計画研究カ班 (宮崎) : 複素境界要素法による周期プラズモン共振器の解析
- [13] 計画研究イ班 - A01 公募研究 (松井) : 有機/半導体界面を用いたメタマテリアル THz 波変調器
- [14] 計画研究イ班 - A01 公募研究 (鈴木) : メタマテリアルレンズ、波長板、偏光素子、他
- [15] 計画研究イ班 - A01 公募研究 (菅) : 微細構造を有する光伝導アンテナからの動径方向偏光放射・検出
- [16] 計画研究ウ班 (中西) - 計画研究イ班 (萩行・高野・宮丸) : チェッカーボード型メタ表面の電磁波応答。自己補対メタ表面における周波数無依存電磁応答。
- [17] 計画研究エ班 (石原) - 計画研究カ班 (杉本) : メタマテリアルによる光起電力 (共著論文発表)
- [18] 計画研究エ班 - A02 公募研究 (金森) : 光領域のマッハツェンダー干渉計の設計、作製。
- [19] 計画研究オ班 (彌田・田中) - 計画研究イ班 (萩行) : スピルリナをテンプレートとして作製したマイクロ金属コイルにおける電磁場特性の解析、テラヘルツ波特性の計測

【その他の活動】

- [1] 計画研究オ班 (彌田・田中)、バイオテンプレート研究会を立ち上げ、総括班メンバーを含む研究者間の相互連携と議論の場をつくる。(新学術領域に関連する招待講演者: 真田、萩行、藤川、富田、村越、高原) <http://biotemplate.org>

8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

【設備等の活用】

まず、すでに研究機関に設置された研究設備を活用することで研究経費を抑制し、効率的に研究を進めた。例えば、計画研究イ班では SIJ による新規メタマテリアル作成および THz 領域の特性評価を大阪大学に集約させた体制を取り、それに応じた設備・装置の購入を行った。そして、計画研究内、計画研究間および公募班間の連携を徹底させることで、様々な新規材料や構造に対応した評価が可能となり、新学術領域研究でしか実現できない成果を上げることができた。また、計画研究カ班によるメタ表面の作製では、物質・材料研究機構に設置された、電子線リソグラフィ装置、ナノインプリントリソグラフィ装置、フォトリソグラフィ装置、FIB 加工装置、電子ビーム蒸着装置、スパッタリング装置、走査型電子顕微鏡、透過電子顕微鏡、赤外顕微鏡など、多くの機材を活用した。

また、「7. 研究組織と各研究項目の連携状況」で述べたように、班間協力を多数行うことで試料作製や特性評価に必要な機材を相互に利用できた。

【総括班研究課題の活動状況】

総括班は、全体会合とメタマテリアル講演会、および、日韓メタマテリアルフォーラムの開催などを通じて、研究グループ間の情報共有に努め、研究協力を推進した。また、これら会合の多くでポスターセッションを開催し、ポスドクや大学院生などの研究発表の場を設けて、若手研究者の育成にも努めた。このために、総括班予算から会合参加のための旅費を支出した。

また、ニュースレターの発行（ウェブ上）や領域のホームページによる広報活動を通じて、研究成果の社会への発信や領域内部での情報共有にも努めた。ホームページや会議の運営については事務員を雇用することはせず、必要な時期だけにアウトソーシングすることで経済的に実施した。会議の開催場所についても多くの場合、大学の施設を利用するなどして経費の節減に努めた。

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細 (計画研究において購入した主要な物品 (設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。) について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関
22	イオンスパッタ成膜装置	エリオニクス EIS-230S	1	40,950,000	40,950,000	東北大学
	超短パルス加工用レーザーシステム	フェムト秒一体型モードロックチタンサファイヤレーザー・フェムト秒再生増幅器・再生増幅器励起用レーザー	1	32,894,400	32,894,400	大阪大学
	ネットワークアナライザ	米国アジレントテクノロジー社 E5071C	1	7,162,345	7,162,345	京都大学
	マイクロ波トランジスタアンプ	マイクロ電子(株)MMA-02400C	1	7,087,500	7,087,500	京都大学
23	テラヘルツ波モジュール	VDI WR-1.0	1	24,013,500	24,013,500	山口大学
	ネットワークアナライザ	Agilent E5071C	1	8,599,500	8,599,500	京都工芸繊維大学
	Er ドープファイバーレーザー	独国 TOPTICA PHOTONICS 社製 FF PRO NIR	1	8,136,030	8,136,030	大阪大学
	ネットワークアナライザ	Agilent N5222A	1	4,987,500	4,987,500	山口大学
	ネットワークアナライザ	R&S ZVA24	1	4,522,350	4,522,350	山口大学
24	光パラメトリック発振装置	コヒレント社製 Mira-OPO PP-Automatic	1	9,754,500	9,754,500	徳島大学
	マクロ・顕微赤外放射スペクトル測定システム	日本分光製 FT/IR-6200S、ITR-500	1	7,423,500	7,423,500	物質・材料研究機構
25	波長可変パルスレーザー	JL-SPO180・出力波長 410-2200 nm	1	7,323,750	7,323,750	物質・材料研究機構
26						

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成22年度】

・旅費

・人件費・謝金

・その他

【平成23年度】

・旅費

【計画研究イ班】 IRMMW-THz2011(ヒューストン)(大阪大学 2名分) 594,120円

・人件費・謝金

【計画研究イ班】 特任研究員雇用 (1名 大阪大学)、2,561,064円 THz メタマテリアルの作成と評価

【計画研究カ班】 ポスドク雇用 (1名)、5,557,720円、メタ表面の創製と評価

・その他

【計画研究カ班】 Er イオン分布の SIMS 分析、403,200円

【平成24年度】

・旅費

【計画研究イ班】 IRMMW-THz2012(オーストラリア・ウーロンゴン)(大阪大学 2名分) 588,416円

【計画研究カ班】 ISMOA シンポジウム (インドネシア・バンドン)、382,766円

【計画研究カ班】 Metamaterials 2013 (フランス・ボルドー)、397,822円

・人件費・謝金

【計画研究イ班】 特任研究員雇用 (1名 大阪大学)、5,188,486円 THz メタマテリアルの作成と評価

【計画研究ウ班】 420万円

【計画研究カ班】 ポスドク雇用 (1名)、5,547,720円、メタ表面の創製と評価

・その他

【平成25年度】

・旅費

【計画研究イ班】 IRMMW-THz2013(ドイツマインツ)(大阪大学 4名分) 1,298,390円

【計画研究イ班】 IRMMW-THz2013(ドイツマインツ)(信州大学 2名分) 807,980円

・人件費・謝金

【計画研究イ班】 特任研究員雇用 (2名 大阪大学)、6,114,005円 THz メタマテリアルの作成と評価

【計画研究カ班】 ポスドクと研究補助員雇用 (各1名)、6,973,680円、メタ表面の創製と評価

・その他

【平成26年度】

・旅費

【計画研究イ班】 Meta14(シンガポール)(大阪大学 3名) 621,440円

【A02 公募研究 (梶川)】 2014/9/1-5 ICP2014 Kuala Lumpur, Malaysia 招待講演、500,430円

【A02 公募研究 (梶川)】 2015-1/4-1/10 NANOMETA2015 Seefeld Austria 発表、489,924円

・人件費・謝金

【計画研究イ班】 特任研究員雇用 (1名 大阪大学)、3,114,800円 THz メタマテリアルの作成と評価

【計画研究カ班】 ポスドク雇用（1名）、5,775,359円、メタ表面の創製と評価

・その他

【計画研究カ班】 分光光度計の修理、235,440円

(3) 最終年度（平成26年度）の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

繰越課題： 「電磁メタマテリアルの研究推進」（総括班）

繰越金額： 200万円

繰越期間： 平成27年7月末まで（4ヶ月間）

使 途： 主に、第5回日韓メタマテリアルフォーラム（ソウル大学、平成27年6月）と領域全体
会合（東京大学、平成27年7月）の開催

理 由： 領域代表の萩行教授のご逝去（平成26年10月）に伴う、研究会行事の延期

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ程度）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

「4. 審査結果の所見及び中間評価で指摘を受けた事項への対応状況」で述べたように、我々は Pendry や Veselago 流の負の屈折率の実現やそれを利用したエキセントリックな光学現象の追求とは一線を画し、信頼性の高い試料作製と明快な理論的基礎に裏付けられた新現象の実証を通して、将来の実用化につながる研究成果の達成を主眼とした。特に、工学系の研究者の多くが、従来のデバイス技術との比較を行って優位性のある技術開発に注力したことは、健全な研究実施に大きく貢献した。

具体的に述べれば、計画研究ア班は独自の研究成果である CRLH 伝送線路理論を基礎として、次世代の応用システムのキーコンポーネントとなり得る各種のデバイスを開発した。また、磁性材料を導入した非相反メタマテリアルによる新規デバイスの可能性を明瞭に提示した。さらに、CRLH 回路のスケールダウンによって THz 領域の負透磁率を実現する等の新しい成果も得られた。

計画研究イ班は、超微細インクジェット工法などの新しい手法によって THz 領域の 2 次元・3 次元メタマテリアルの開発を進めた。特に、結合分割リング共振器による量子力学に依らない EIT の実証や、自己補対チェッカーボード構造によるバビネの定理の実証等、原理面の探求を進めた。その一方で、高性能なメタマテリアル波長板を開発する等、THz 分光分野の発展に寄与する実用的な成果を上げた。

計画研究ウ班は、メタマテリアルによるブリュースター現象や、自己補対メタ表面による周波数無依存応答、量子力学に依らない EIT の実現、マイクロ波パルスの保存／再生等、原理面の実証研究を強力に推進した。また、プラズマ中で負の透磁率を実現して電磁波伝搬を可能するといった新奇現象も見出した。

計画研究エ班では、これまであまり注目されていなかったメタマテリアルの光整流効果について、基礎的な理解を深めた。合金薄膜の酸処理で大面積の試料が簡単に得られるナノポーラスゴールドでも、比較的大きな光起電力が得られた。また、微細電場分布によるリソグラフィ技術を導波路モードに適用することでサブ波長 3 次元構造の作製を達成した。

計画研究オ班は、電子ビーム描画や 2 光子還元法などのトップダウン的な手法と、金属の残留応力や金属微粒子の磁化などを利用した自己組織化によるボトムアップ的な手法を巧みに利用して、光波領域の 3 次元メタマテリアルを大面積で作製することに成功した。また、DNA や螺旋藻類を利用したユニークな作製手法を考案して、マイクロメートルスケールの金属コイルの大量合成に成功するなどした。

計画研究カ班は、電子線リソグラフィやナノインプリント等の微細加工技術を用いて、光波領域のメタ表面の作製を強力に推進した。これらの手法により光波 MIM 共振器を作製し、磁気双極子遷移や非線形光学効果の増強を実証するとともに、波長選択的熱放射赤外光源を開発した。その一方で、光ディラックコーンの生成条件を解明し、電子の有効質量制御に拡張する等の理論研究の成果も得られた。

公募研究では、MEMS 駆動による能動デバイスの実現などの特筆すべき成果が得られた。

以上の研究成果を見れば、この新学術領域研究「電磁メタマテリアル」が Pendry や Veselago 流の負の屈折率の実現に重きを置かなかったことは明瞭である。信頼性の高いサブ波長試料作製技術の構築と明快な理論的基礎に裏付けられた新現象の実証、および、これらを基礎としたデバイス開発を通して、メタマテリアルの実用化のための確固たる基盤が構築できた。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ程度）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者の研究終了後の動向等を記述してください。

【計画研究ア班】

学生受賞 14 件

- 電気学会論文賞 B、1 名、2015 年 2 月
- 電子情報通信学会学術奨励賞、1 名、2015 年 3 月
- 電子情報通信学会中国支部奨励賞、2 名、2015 年 2 月
- 2014 Thailand-Japan Microwave Best Student Award、1 名、2014 年 11 月
- 電子情報通信学会学術奨励賞、1 名、2014 年 3 月
- 電子情報通信学会中国支部奨励賞、2 名、2014 年 3 月
- 電気学会論文発表賞 B、1 名、2013 年 12 月
- 2013 Asia-Pacific Microwave Conference、Best Student Paper Award、1 名、2013 年 11 月
- 電子情報通信学会平成 25 年アンテナ・伝播研究専門委員会若手奨励賞、1 名、2013 年 12 月
- 電子情報通信学会中国支部奨励賞、1 名、2013 年 5 月
- 電気学会中国支部奨励賞、1 名、2011 年 2 月
- 電子情報通信学会中国支部奨励賞、1 名、2011 年 5 月

【計画研究イ班】

- 平成 25 年度まで博士課程学生であった者 1 名は東京大学物性研究所特任研究員

学生受賞 2 件

- 第 25 回光物性研究会奨励賞 1 名 2014 年 12 月 19 日
- 応用物理学会関西支部 平成 26 年度第 2 回講演会ポスター賞（優秀賞）1 名 2014 年 11 月

【計画研究ウ班】

- 平成 23 年度まで博士課程学生、平成 24 年度に本研究の研究員であった者 1 名が、平成 25 年度に長岡技術科学大学の助教に就職

- 平成 26 年度途中まで博士課程学生であった者 1 名が、信州大学の助教に就職
（両氏共に、博士課程在籍時にメタマテリアルの研究に従事し、博士号を取得）

学生受賞 3 件

- Metamaterials 2014、2nd Prize for the Student Paper Competition、1 名、2014 年 8 月
- International Symposium on Frontier of Terahertz Science 2014、The Best Presentation Award for Young Researchers、1 名、2014 年 8 月
- International Symposium on Frontier of Terahertz Science 2014、The Best Student Poster Award、1 名、2014 年 8 月

【計画研究エ班】

- 2011 年 4 月～2012 年 3 月まで新学術領域ポスドクを務めた者 1 名が、Computer Network Information Center、Chinese Academy of Science の Associate Research Fellow に就職
- 京大情報で 2012 年 3 月に学位取得後、4 月に新学術のポスドクを一月務めた者 1 名が、名古屋大学工学研究科機械理工学専攻の助教に就職
- 京大情報で 2013 年 3 月に学位取得後、2013 年 4 月～10 月に新学術のポスドクを務めた者 1 名が、京都大学情報学研究科の助教に就職
- 東北大物理で 2013 年 3 月学位取得した者 1 名が、北大電子研のポスドク（量子情報分野）を経て、2015 年 4 月より物質・材料研究機構でポスドク（メタマテリアル分野）に採用
- 2011 年度～2012 年度に新学術（東北大）に研究員として参加した者 1 名が、2013 年 4 月より福岡大学理学部物理学科の助教に就職

【計画研究オ班】

- 博士研究員 1 名が 2013 年 2 月より東北大学の助教として就職.
- 博士研究員 1 名が 2014 年 4 月より岡山大学の助教として就職.
- 2012 Taiwan-Japan Nanophotonics and Plasmonic Metamaterials Workshop、Best Poster Paper Award 受賞 石川篤、田中拓男（理化学研究所）（2012.1.11-12）
- 第 2 回先端フォトニクスシンポジウム 人気ポスター賞（2011.10.7）石川篤、田中拓男（理化学研究所）
- The 5th International Conference on Surface Plasmon Photonics (SPP5) Best Poster Paper

Prize 受賞 玉木（渡邊）亮子、田中拓男（理化学研究所）（2011.5.20）

- 2013 年 nanotech 展にて nano tech award 2013 超微細加工技術部門 部門賞受賞

【公募研究 A02（金森）】

- 平成 25 年 3 月に東北大・石原研究室で修士課程を修了した学生が平成 25 年 4 月から東北大学工学研究科金森研究室に博士課程で入学。博士課程 2 年から光メタマテリアルに関する研究で日本学術振興会特別研究員（DC2）採用。

11. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

総括班評価者として、大阪大学名誉教授の張紀久夫先生に評価コメントをお願いした。張教授は光物性物理学に造詣が深く、特に半導体物性やフォトニック結晶の光学特性について数々の理論研究をご発表になられている。大阪大学をご退官後も、豊田理化学研究所フェローや大阪大学レーザーエネルギー学研究所招聘教授などを歴任された。最近も、シュプリンガー・フェアラク東京から「ナノ構造物質の光学応答」を出版されて、ご自身が開発された「微視的非局所光学応答」理論の普及に努められている。微視的非局所光学応答理論はメタマテリアルの実効屈折率の導出にも関係が深く、張教授ご自身はこの分野で通常行われている直感的な導出には批判的なお立場である。

張教授には本新学術領域の全体会合や、本領域の主催する日韓メタマテリアルフォーラムやメタマテリアル講演会にご出席頂き、ご講演をお願いするとともに、研究内容に関するコメントやアドバイスを頂いてきた。以下の評価コメントは、事前に事後評価報告書本体をお送りして内容をご確認頂いた上で、記入して頂いた。

【評価コメント】 総括班評価者 大阪大学名誉教授 張紀久夫

メタマテリアル (MM) は「未知の電磁応答を示すような自然界には存在しない人工物質」を表す概念であるが、その対象とする現象はマクロな電磁気学で記述される電磁応答であり、マクロな感受率で特徴付けられる「メタ原子・分子」の配置により新規現象の発現を探求するものである。その登場の際に「 $\epsilon < 0$, $\mu < 0$ で特徴付けられる左手系物質」という当時としては非常識な状況を前提にしていたため、あたかも原理的な問題のような印象を与えた。しかし感受率は物質励起の寄与の総和で与えられ各励起準位の近傍では共鳴に伴う負の値が現れ得るという一般論から言えば、分割リング共振器で $\mu < 0$ を作り出したのは金属電子の集団励起モードを利用したのであって、原理的に新しいことではない。その意味で MM 研究は物理の基礎的問題を探るといふより、現象論的な感受率のパラメーターを幅広く想定して従来より広い電磁応答の可能性を探ろうとする工学的な学問分野と言える。

しかし、感受率パラメーターにはマイクロな定義に基く制約があって MM として想定できる範囲は必ずしも自由ではなく、またカイラル系の構成方程式には何通りも異なる形が用いられているというマクロ電磁気学の不備もある。また、物質中に生成される分極はマイクロとマクロに峻別されているわけではなく、注目する波長域や物質の形態に応じてどちらかが強く現れたり、或いは大差なく混在したりする状況がいくらかでもあって、物質のマクロな記述だけで済みます MM の研究には早晚限界がある。そのような認識を反映して、MM 研究の近未来テーマとして「量子 MM」を掲げるリーダーも世界には存在する。MM に隣接する学問分野には半導体ナノ構造を利用した量子論的な新物質・新奇応答を探求する基礎的な物性研究とその応用的な工学研究があり、MM 研究との境界は互いに融け合っている。現状では物質の記述に量子力学を用いるか用いないかが両者の実務上の違いになっているが、それで研究分野を区別するのは学術的にはあまり意味がなく、逆に、この方向が MM 研究の（欧米に後れを取っていない）近未来像の一つあるとも言える。

このような背景の中で、当新学術研究班の計画が（欧米に比べて出遅れたという前提の下に）ものづくりセンスを生かして着実な応用を視野に入れた独自性のある MM 開発という方向に進んだことは理解できる。得られた成果の中に、中間評価の際に指摘された共同研究の推進によるものがいくつも出てきているのは喜ばしい。例えば、[A] MM 中の分散曲線に現れるディラックコーンの系統的な理論解析を回路網 MM の実験と比較する研究、[B] マイクロ波領域の磁気カイラル効果測定用のメタ分子作成と観測およびその理論解析などである。また独自性のあるもの作りとして注目されるのは、イ班の[C] 超微細インクジェット工法による 2、3次元 MM の作成・評価、オ班の[D] 種々のレーザー加工技術を用いたトップダウンおよびボトムアップ型の光領域 MM の作成と応用、ウ班の[E] 気体プラズマを導入した動的な MM の研究、であろう。

これらの例を含む多くの成果は現段階でも（技術レベルや独自性の観点で）世界的にも引けを取らないものと見られるが、理論と実験の協力や理論解析についても一段の向上を図れば更に高いレベルに至る直前まで来ている。例えば、上記[D]の技術で作るさまざまな MM 試料の精密な物性評価と理論解析を系統的に進めてゆくことでメタ分子のサイズ・形状・配列に応じた光学応答の精密な理解が高度に進むであろう。また、[B]のメタ分子による磁気カイラル効果の解析で、単一メタ分子を一様な MM 層として近似することなく単一分子そのものとして扱う理論解析を行えば、それは量子 MM の方向へ踏み出す第一歩である。

研究班全体で広い波長域をカバーするため、回路要素で物質を記述するグループと感受率で記述するグループが一緒に議論することになり、言葉遣いの通用に不便もあった。本来どちらも（用いる波長域が

違うだけの) 電磁応答理論であるから両者の関係を見通す記述法があるはずで、それを明らかにすることはこの研究班にとってふさわしい問題であったが、それに着手する試みが現れなかったのはいささか残念であった。