



< 研究紹介・自己紹介 >

研究項目 A02 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」

研究代表者 石原 一 (大阪府立大学)

本年度より公募研究として新たに領域に加えて頂きました大阪府立大学の石原です。これまでメタマテリアルの研究会等への参加機会が少なく、新たに交流させて頂く方が多い領域ですので、研究背景や関連文献なども含めて自己紹介をさせていただきます。

私は大阪大学基礎工学研究科の張紀久夫先生の研究室で研究をスタートさせ、1990年に学位を取得しました。研究テーマは薄膜等のナノ系に閉じ込められた励起子の非局所的光学応答で、光電場と誘起分極を自己無撞着に計算することにより、ナノオーダーの試料サイズ変化に対して敏感な光学応答を議論しました。学位論文では当時盛んに議論されていた三次非線形感受率の試料サイズ依存性や非局所応答理論の非線形への拡張を扱い、結果は学会等で多くの方に議論して頂きました。学位取得後、三菱電機(株)に入社しました。入社後しばらくして幸運にもJSTの「さきがけ研究」に採択され、非局所応答理論を基礎にした非線形光学応答の研究をさらに発展させることが来ました。この時も分野を超えて多くの方と交流する機会を持ち、特に実験グループの方々と共同研究出来たことがその後の自分の研究の進め方に影響を与えたように思います。約5年の企業経験の後、大阪大学の張研究室に教員として戻ることになりました。そこでは閉じ込め励起子系の非線形光学応答理論、微小共振器-励起子結合系の非線形応答理論などの研究を進めました。特に、ナノ系の光学応答解析では、従来はほとんど無視されてきた内部光電場の微視的空間構造の役割に注目し、非線形応答のサイズ共鳴増大など、非局所応答特有の現象を議論しました[H. Ishihara, J. of Phys.: Cond. Mat. **16** R247 (2004)などにレビューがあります]。一連の研究では、多自由度を持つナノ系で光電場と電子系波動関数の空間的インタープレイがもたらす新奇な光学応答を議論し、三菱電機(株)の井須敏郎先生(現徳島大)、理研の瀬川勇三郎先生らとの共同研究により実験的にも実証されました[H. Ishihara et al., Phys. Rev. Lett. **89** 017402 (2002), A. Shouji et al., Phys. Rev. Lett, **92**, 257401 (2004)など]。これらの成果は、企業やさきがけ時代からお世話になった先生方との共同研究が開花したものでした。この



一連の研究が基礎になって 2002 年には JST-CREST 研究に採択されました。阪大伊藤正先生、東北大枝松圭一先生、上記の井須敏郎先生に分担者として御参画頂き、さらに研究を進めることが出来ました。このプロジェクトの研究を通して従来マイクロとマクロの異なる階層に属するものとして独立に取り扱われていた自由度（例えば電子波動関数と光波動の空間自由度など）のインタープレイを強く意識するようになりました。この研究は現在も続いており、最近も阪大伊藤研（現芦田研）との共同研究により、光と励起子の数波長に渡る相互作用体積が fs クラスの超高速輻射緩和を実現することを実証しています[M. Ichimiya et al., *Phys. Rev. Lett.* **103**, 257401 (2009)]。

一方、上記 CREST 研究を契機に量子電磁気学や量子光学関連の研究も増えてきました。CREST では枝松先生のグループと共同で、固体など多自由度系での量子位相ゲート実現を視野に入れた 2 光子非線形の研究も行いました。理論グループでは、2 光子非線形の理論的手法[K. Koshino and H. I., *Phys. Rev. Lett.* **93** 173601 (2004)]や、多原子系で 2 光子非線形を効率的に引き起こすための原理[A. Ishikawa and H. I., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 203602 (2008)]などを明らかにしてきました。さらに、高効率な「もつれ光子対」生成技術をターゲットにした枝松先生代表の学術創成研究に参画し、共振器や上記の光電場-励起子空間インタープレイを活用した高効率な生成原理を提案してきました[H. Oka and H. I., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 170505 (2008), M. Bamba and H. I. *Phys. Rev. Lett.* **105**, 123906 (2010)]。これらの研究では、従来の単一原子と単一光子の相互作用を越えて、物質が多自由度を持つことが光子の量子的性質にどのような影響を与えるかという問題に注目しました。

上記の一連の研究とは少し毛色の違う研究として、2000 年前後より、共鳴光学応答による輻射力の研究にも力を入れ始めました。ナノ系の共鳴光学応答は、応答が共鳴的に増大すること以外にも、試料のサイズや形状に敏感に依存するという特徴を持ちます。一方、輻射圧や電場勾配が分極に及ぼす力を用いて微粒子を力学的に操作する技術があります。ナノ系の共鳴光学応答の特長をこのような力学的操作に用いれば、通常ナノサイズ試料を動かすには十分ではない輻射による力を増強させるだけでなく、ナノ微粒子個々の量子力学的個性を選別する形で微粒子操作ができます。これは、ナノ構造のマイクロな量子力学的自由度とマクロな運動自由度がリンクする、従来あまり意識されていなかったインタープレイに注目するものです。これに関連した研究では現在大阪府立大学

21世紀科学研究機構の一員として独立している飯田琢也先生が活躍し、関連論文[T. Iida and H. I. Phys. Rev. Lett. **90** 057403 (2003), Phys. Rev. Lett. **97**, 117402 (2006), Phys. Rev. **B77**, 245319 (2008)など]のいくつかが米物理学会HPのonline記事として紹介されました[Phys. Rev. Focus **11**, Story 6, 11 Feb. (2003), Phys. Rev. Focus **21**, Story 21, 25 Jun. (2008)]。また昨年、関連する解説記事が物理学会誌に掲載されています[日本物理学会誌 **65**, 12, 938 (2010)]。原理の一部は大阪大学伊藤(芦田)研との共同研究で実験実証され[K. Inaba et al., phys. stat. solid. (b) **243**, 3829 (2006)]、最近では研究室のポスドクや学生の協力を得て、主に有機光化学を専門とするグループとナノギャップや集光ビームを用いた分子トラップの共同研究を進めています[例えば北大坪井泰之先生と Y. Tsuboi et al., J. of Phys. Chem. Lett. **1**, 2327 (2010)など]。

ここ数年は北大三澤弘明先生を代表とする特定領域研究「光・分子強結合場」で局在光電場と分子(量子ドット)の相互作用の研究に力を入れてきました。金属ナノギャップではプラズモン共鳴により局在光電場が生じることが知られていますが、特長として、その増強度、局在性、また局在性ゆえ電場のナノスケールな空間変動も重要になります。特に最後の性質のため、通常の高波長近似を基にした光学選択則が破れ、光と分子波動関数の空間的インタープレイが重要となる場合が想定されます[応用物理 **80**, 9, 779

(2011)に解説記事]。本研究ではその様な分子励起の特異な選択則も議論しましたが[T. Iida, Y. Aiba and H. I., Appl. Phys. Lett **98**, 053108 (2011)など]、さらに興味深いことは、ナノギャップにおける局在モードを介して、単分子レベルで物質と光が効率よくエネルギーを交換する現象です。これは表現を変えれば、金属アンテナ系と分子が一つのコヒーレントな結合系として振る舞うということで、そのような場合は、強い光電場が一方向的に分子に影響を与えるだけでな

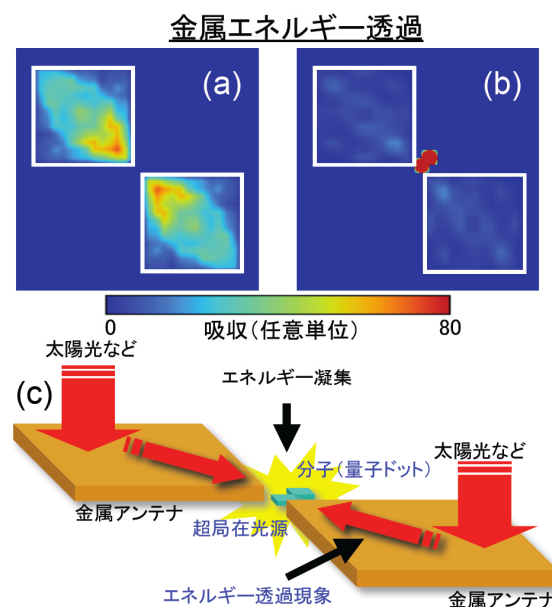


図1:
 (a):金属アンテナに光照射した際の吸収(分子(ドット)無し)。
 (b):ギャップ位置に量子ドットが配置され時、金属でエネルギー透過が起こり、ドットでエネルギー凝集が起こる。
 (c):計算モデルの模式図

く、分子もまた光との結合を通してプラズモンスペクトルに影響を与えます。例えば図1は金属ナノ構造で作製された光アンテナを励起することによって、局在プラズモンにより結合した分子に吸収が起こっている状況を示したものです[J. Photochem. Photobio. A: Chemistry **211**, 148 (2011)]。興味深いのは、想定している共鳴条件では、通常は強い吸収や散逸のある金属構造に吸収がほとんど無くなり、光エネルギーが分子に集中している点です。このような金属でのエネルギー透過は、アンテナ・分子のコヒーレントな結合状態間の干渉効果により説明されますが、電磁誘導透過(EIT)類似の物理現象が金属のエネルギー透過として起こっていると見ることも出来ます。この現象は全量子論で太陽光のコヒーレント長を想定した計算でも確かめられ、また相関光子対のアップコンバージョンなどでも顕著な役割を果たすことが分かっています。さらに励起強度を上げることにより、分子が二準位系であっても反転分布を起こすことなどが明らかになってきました。今後、このような現象が、新しい光機能の議論に結びつけばと期待しています。

さて、ここまで長々と研究背景を説明してきたにも関わらず、メタマテリアル研究に直結しそうな要素があまり出てきませんでした。一つ関連して、本公募研究では以下のことに注目したいと考えています。すなわち、最後の例にもあるようにフォトニック結晶やメタマテリアルの研究で良く議論される、いわゆる幾何学的構造共鳴とナノ系で現れる電子共鳴のインタープレイ、とくにこれらのコヒーレントな結合を通じた現象です。よく知られる共振器フォトンと量子ドットの結合も幾何学的構造共鳴と電子共鳴のインタープレイの典型例と見る事が出来ますが、幾何学的構造にはさらに多彩な自由度があり、電子共鳴とのインタープレイは多様です。二つの共鳴のインタープレイは、単なる足し合わせではなく、線を掛け合わせて面になる以上の自由度の拡張があると期待されます。メタマテリアル研究には幾何学的な構造自由度を如何に活用して新しい機能を造り出すかという側面も有ることを考えると、電子共鳴とのインタープレイを導入することにより、一層多様な可能性が追求できるのではないかと考えています。今回採択していただいた課題では、このようなインタープレイが積極的な役割を果たす例として、例えばメタマテリアル的な入出力にアクティブな要素が付加された新しい光機能を提案することが出来ればと考えています。今後、本領域の先生方と様々な方面から議論させて頂ければ幸いです。

＜研究紹介・自己紹介＞

研究項目 A02: 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」

研究分担者 岩長祐伸（物質・材料研究機構）

＜自己紹介に代えて 一新学術研究のなかの役割＞

新学術領域研究の計画研究で光周波数におけるプラズモン共鳴をもつメタマテリアル表面の研究に参画しています。研究課題名は実証主義的な色彩が濃く、物材機構のナノ加工技術を生かす立場を鮮明に示したものと見えます。

表面と言えるくらい“浅い”構造においても特徴的な共鳴状態を発現するプラズモン共鳴を切り口に特徴ある光（電磁波）の状態を実現すること、および、その光を使うことではじめて可能になる現象の開拓が主たる課題となると、個人的に理解しつつ、ナノ加工技術のその先にあるものを開拓する部分が私の連携内容となりそうだと思っております。

本新学術研究領域はマイクロ波から光周波数まで広範な研究者が集っておりますので、周波数軸の広がり度で光において設計されたデザインがマイクロ波でも使われるようなことがあれば望外の喜びです。スプリットリング共振器がマイクロ波から光にアイデア供給されたことはメタマテリアル分野の研究者には周知のことですが、逆のことがこの研究領域で起こることを期待もしておりますし、その一翼を担うことも目指したいと考えています。

当計画研究班で目下遂行中の研究内容については同じ班のほかの方々から紹介されるものと思われまますので、以下ではここ数年のメタマテリアル関連の研究結果について述べながら、メタマテリアル研究の特徴にも触れようと思ひます。

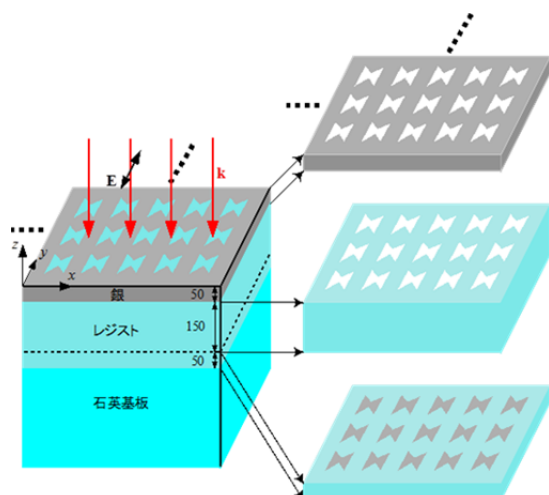


図1 相補的積層構造の概念図。孔の空いた金属膜（上層）と金属ナノ構造配列（下層）が近接場を介して結合し、異方的な局在プラズモン共鳴を生じる。蝶型の配列周期は 1000 nm であり、上中下層の厚さはそれぞれ 50, 150, 50 nm である。単位構造の寸法については [1] 参照。

<研究紹介>

私がここ数年で行った研究は「光波操作素子の極小化」、「プラズモニック結晶の固有状態の解明」と大別できます。

光波操作素子とは偏光子や波長板、円二色性素子などのことで、平面波の偏光ベクトルと位相を操作する際にその効率を最も高める構造を導入することでサイズ（厚み）を極小化することができることを示しました。

図1は実際に作製した相補的積層構造と呼んでいる3層1セットの積層構造の模式図で、この構造はサブ波長の厚さで偏光子として機能します。相補的な積層は偏光選択性を向上するのに有利な構造であることはバビネの原理を使って示すことができます。実際、波長 1650 nm で 10^3 より大きな消光比を実現しました。金属（銀）と透明誘電体（ここではレジストと石英基板、いずれも近赤外光域で誘電率 1.5 程度）からなり、レジストに孔の空いた中間層の厚さを 150 nm 程度にすると上下層のプラズモニック電磁場が最も効果的に近接場結合して一つの局在プラズモン共鳴を形成します[2]。そのサブ波長空間における電磁ダイナミクスはプラズモン共鳴の自由度の大きさを示唆して興味深いですが、長くなるので詳細な説明は文献に譲ります（日本語では[3]）。

偏光子の他にも波長の3分の1以下の薄さをもつ波長板の具体的な設計[4]、波長よりも薄い円二色性素子の設計[5]など光波操作素子の系統的な極小化が可能であることを示しました。既存の固体材料の研削、貼り合わせなどでは到底達成できない薄さであり、メタマテリアル（“超”物質）と呼ぶに値する機能だと考えています。

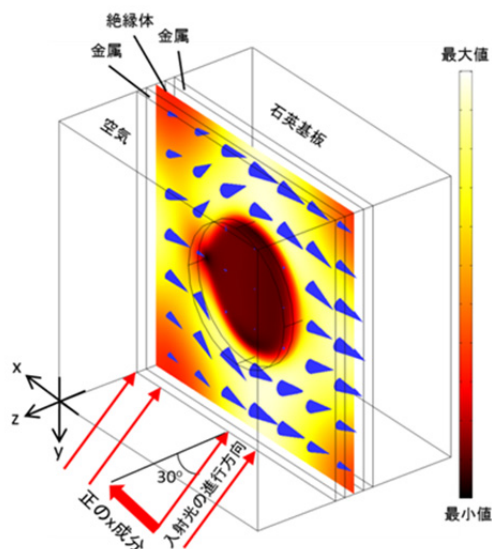


図2 フィッシュネット・メタマテリアルの最低次の TM 固有状態の電磁エネルギー密度流（ポインティングベクトル）の計算結果。入射光の面内波数ベクトル成分と逆向きの流れが励起されていることが分かる。図では単位ドメインを示している。

もう一つの研究群では、金属ナノ周期構造体であるメタマテリアルをプラズモニック結晶と素直に理解して、その固有状態を直接的に明らかにすることを行っています。先述の相補的積層構造の固有状態解明[6]に続いて、フィッシュネット・メタマテリアルの固有状態を明らかにし[7]、最近では円環孔アレーからなるプラズモニック結晶の固有状態も最近報告しました[8]。

フィッシュネット・メタマテリアルは光周波数で最も成功したメタマテリアルと言ってよく、有効屈折率が負の値をとることがよく知られています。この負の有効屈折率に対応する固有状態はこれまで未解明でしたが、分散関係の解析と固有電磁場を直接的に計算することによって、面内で負の群速度をもつ状態であることを示しました。これにより、斜め入射下の負の屈折現象が生じる起源を知ることができました。図2はその様子を示しています。数値計算の方法としては有限要素法を用い、マクスウェル方程式を空間座標で直接解いた結果です。このように、近似的なモデルや概念（有効屈折率など）はメタマテリアル研究のなかに必要なものではなく、直接的に第一原理計算（電磁気学においてはマクスウェル方程式を直接的に解くこと）を実施し、解析結果を吟味することが今後の本流になるものと考えています。

メタマテリアル研究の特徴として、移り変わりの早さが挙げられます。一例として、ヨーロッパのメタマテリアル会議（Metamaterials 20XX シリーズ）では 2007 年当時は負の有効屈折率が盛んに扱われましたが、2009 年ではクロッキングに置き換わり、2011 年では話題が応用も含めて多方面に広がっていました。いまや負の有効屈折率に関する発表を聞くこと自体が珍しいといった具合です。本新学術領域研究の成果としてこの先何が現れてくるか、私としても楽しみにしながら研究に参画している次第です。

参考文献

- [1] M. Iwanaga, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 083106 (2010).
 - [2] M. Iwanaga, *Opt. Express* **18**, 15389 (2010).
 - [3] 岩長祐伸, 「プラズモニクス—光・電子デバイス開発最前線」(エヌ・ティー・エス刊, 2011) p. 37-51.
 - [4] M. Iwanaga, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 153102 (2008).
-



- [5] M. Iwanaga, “Collective Plasmonic States Emerged in Metallic Nanorod Array and Their Application,” in *Nanorods (InTech, Rijeka, to appear in Feb. 2012)*.
- [6] M. Iwanaga, *Phys. Rev. B* **82**, 155402 (2010).
- [7] M. Iwanaga, *Opt. Lett.* **36**, 2504 (2011).
- [8] M. Iwanaga, N. Ikeda, and Y. Sugimoto, *Phys. Rev. B* **85**, 045427 (2012).



<研究紹介・自己紹介>

研究項目 A02: 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」

研究分担者 宮崎英樹（物質・材料研究機構）

専門は機械工学です。ある機能を実現するために構造物の形や寸法を設計し、製造するための学問が機械工学であることを思い起こせば、メタマテリアルの開発が機械屋の仕事であることに納得いただけるでしょう。

光に関する知識や技術は浜松ホトニクス株式会社で身に付けました（1989-94年）。担当した仕事は光パラメトリック発振器の製品化でした。パラメトリック発振器はマイクロ波領域に古いお手本があります。この仕事を通じて、電波と光のアナロジーを強く意識するようになりました。特に気になって仕方がなかったのが、なぜ光にはアンテナがないのか、ということでした。当初は単に、小さくて作るのが難しいからだろうと考えました。けれども考えが進むにつれ、そう単純な問題ではないと気付きました。まず、電波と光では金属の性質が異なるので、従来のアンテナの設計手法はそのままでは使えないはずです。また、検波やFM変調のようなコヒーレント信号処理技術が未確立の光領域では、アンテナだけ作っても役に立ちません。それで、マイクロマシンや近接場光学など、関連のありそうなことを勉強しつつ、光のアンテナはどういう材料でできたどんな形のものであるべきか、もしもそれができたら何の役に立つのか、ということを考えるようになりました。会社で自分のテーマを持てる時が来たら光のアンテナに取り組むつもりでした。本来の業務とは無関係のそういう勉強に時間を使うことを許して下さった鈴木英夫さん、原勉室長、鈴木義二所長を始め、会社でお世話になった方々への感謝の念を忘れることはありません。

けれども、1994年、私は会社を辞め、東京大学先端科学技術研究センターのロボット工学の研究室に移りました。佐藤知正先生から、走査電子顕微鏡の中でマイクロマシンを組み立てる技術を開発しないかと声をかけていただいたのがきっかけでした。当初、アンテナはリソグラフィで作るものと思い込んでいましたが、もしかしたら波長サイズの粒子や棒を機械的に並べた方が近道かも知れない、そのチャンスは今しかないと考えたのです。けれども、いざ移ったものの、具体的に何をどう並べて、何を測れば良いのか、さっぱりわかりませんでした。当時、遠赤外領域のアンテナが防衛大学やスイス連邦工科大学で研

究されてきました。主な材料はニッケルやタングステンで、共鳴よりも検波が関心の対象でした。当時はこれを粒子に置き換えて小型化することをイメージしていました。それでいろいろな研究室にお邪魔

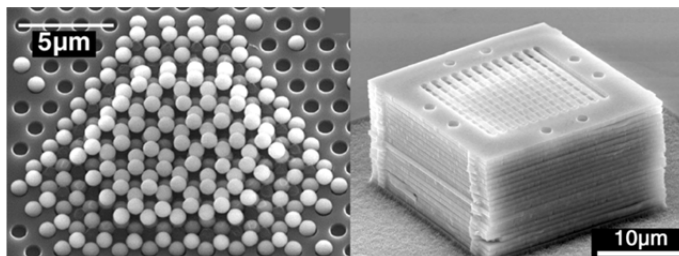


図1 代表的なフォトニック結晶[1,2]

しては相談していたところ、榊裕之先生の研究室で助手をされていた秋山英文先生が、アンテナとはちょっと違うけどこういう話がありますよ、と棒を並べたマイクロ波帯の2次元フォトニック結晶の研究の話を教えて下さいました。これならできるぞ、と思い、まずは何を作れば良いかがわかっているフォトニック結晶から着手することにしました。具体的には直径1 μm 程度のコロイド粒子を1個1個並べたり積み上げたりしました(図1)。この研究を通じて、大高一雄先生、宮寄博司先生、宮野健次郎先生、國府田隆夫先生などなど、本当に多くの先生方から直接ご指導をいただきました。フラフラと現れた、物理のことも、そもそも研究の進め方も知らない私に、どなたもよく辛抱強くお付き合い下さったものと、本当に信じられない思いで感謝しています。

特に宮野先生とはいつもアンテナの話が弾み、時々重要な論文を教えてくださいましたが、1999年12月1日のこと、先週のPRLの論文はアンテナじゃないですか、という短いメールが届きました。H. Xu et al., Phys. Rev. Lett. 83, 4357 (1999)のことです。これには大変な衝撃を受けました。銀ナノ粒子ダイマーが受信アンテナ兼送信アンテナとして働き、給電点に置いた分子のラマン散乱を10桁も増強するというのです。材料は銀だ、構造として大事なものは、電波のアンテナのように長さが半波長であることではなく、ギャップを持つことだ、そして、光アンテナは高感度検出に役に立つのだ。この論文には長年探していた答がすべて詰まっていました。

当時、東大の助手の任期を終え、金属材料技術研究所(今の物質・材料研究機構)にポスドクとして置いてもらっていました。この頃書いた「光のアンテナを作って輻射場を制御する」(タイトルは採択時に微修正)という提案がさきがけ研究(2000-03年)に採択されました。まずはマニピュレーションで銀ナノ粒子を並べて基本特性を調べ、次にリソグラフィでナノギャップを持つパターンを作り、最後は特定の方向に放射する八木アンテナを作る、という構想で

した。何の実績もない私の怪しげな提案を採択下さった曾我直弘先生ほか、アドバイザーの先生方のご英断にも驚くばかりです。

この時期に宮寄先生から数値計算を教わったのは大きな財産になりましたが、実験の方は、田丸博晴さんと銀ナノ粒子ダイマーの共鳴について調べ、単一分子ラマン増強の追試をした程度でした。自分は正しい方向に進んでいないのではないかと、ずっと引っかかるものがありました。ナノギャップを見通しよい設計に基づいて、制御された形で、再現性良く実現するにはどうすればよいか、考え続けていました。銀ナノ粒子ダイマーの共鳴モードは結合したミー共鳴と考えるにはあまりにも歪んでいます。そのモードはギャップを行き来する定在波とも見なせ、それなら数

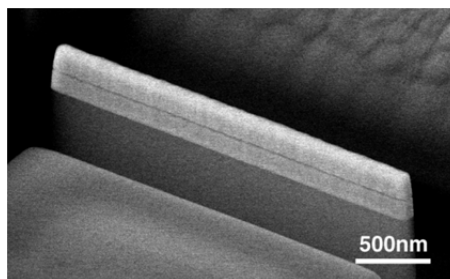


図2 プラズモンナノ共振器[3]

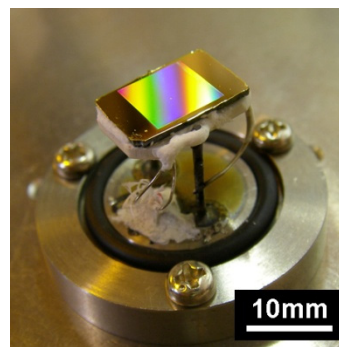


図3 赤外光源[4]

nm の誘電体層を金で挟んだ有限長さの共振器が等価な働きをする、と考えがまとまり、具体的に結果が出始めたのは、さきがけ研究が終わってからでした。作ったのは極めてシンプルな構造ですが（図2）、多くの人が持つアンテナのイメージとはもはやかけ離れたものなので、これをアンテナだとはあえて呼んでいません。けれども、自分ではこれが光アンテナの一つの基本形だと思っています。そして、今回の新学術領域でもメタマテリアルの構成要素（メタ原子）としてこれを使います。

本来の目的であった表面増強ラマン散乱の研究はお休み中ですが、この研究はその後、ナルックス株式会社との赤外光源の開発に発展しました。私の言葉で言うと、これは熱すると赤外光を放射するアンテナアレイです（図3）。

今の研究所は、正直なところ、ろくな業績がなく就職活動に失敗し続けた私が辛うじて職を得ることができた場所、というのに過ぎません。当初はひとりぼっちで、ここは強い鉄を作るところだ、そんなことをやるところではない、と言われました。ところがその後、迫田和彰ユニット長や杉本喜正さんなどが移って来られ、ナノファブリケーション設備が動き出し、気が付くと、ここは「そんなことをやるところ」になっていました。



新学術領域研究に参加するにあたっては、いろいろ思うことがあります。今の私があるのは、1995年に重点領域研究「相互量子制御」の会議に参加させていただいたお陰です。秋山先生が、五神真先生、清水明先生に働きかけ、私に発表の機会を与えて下さったのです。公募研究者ですらない私は、それが何の集まりなのかもわからずに参加しました。どうしてそんなことが可能だったのか、今もよくわかりませんが、とにかく何か特別な扱いをして下さったはずで、そこで、日本を代表する多くの物理学者の先生方と出会うこととなりました。不勉強で理解力のない自分なんて、無視されたり、馬鹿にされて帰ってくることになるはずだと覚悟して出かけました。ところが、まったく思いがけないことに、皆さん、私のことを尊重し、暖かく迎えて下さいました。多くの方と仲良くなり、翌年からは正式に公募研究者として参加し、フォトニック結晶について何とか実験結果が出せるまでになりました。今回の新学術領域にも当時知り合った先生方が何人もいらっしゃいます。今回は計画班のメンバーとして、当時の自分のような方を自分が支える番である、と思っています。

本新学術領域研究で、私は既に一つだけ大きな成果を残したと感じています。それは、チェボンソックさんを発掘したことです。チェさんは世界的一流企業であるサムスン電子を退社し、震災後間もない2011年4月から、私達の班にポスドクとして加わって下さいました。偶然にも公募班の金森先生のお弟子さんでもあります。光MEMSや半導体プロセスの専門家で、微細加工を担当していただけつもりでしたが、それだけでなく、計算から測定まで、4月以来、目覚ましい活躍で、私達の班を引っ張って下さっています。私がやったのは、公募を出した、というだけですが、多数の優秀な応募者の中からチェさんに注目して、逃さなかった、という点を持って若干貢献できたと思っています。私自身もこれから頑張らねばなりません。よろしく願いいたします。

【参考文献】

- [1] F. Garcia-Santamaria et al., *Adv. Mater.* **14**, 1144 (2002).
- [2] K. Aoki et al., *Nature Mater.* **2**, 117 (2003).
- [3] H. T. Miyazaki and Y. Kurokawa, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 097401 (2006).
- [4] K. Ikeda et al., *Appl. Phys. Lett.* **92**, 021117 (2008).