



## ＜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

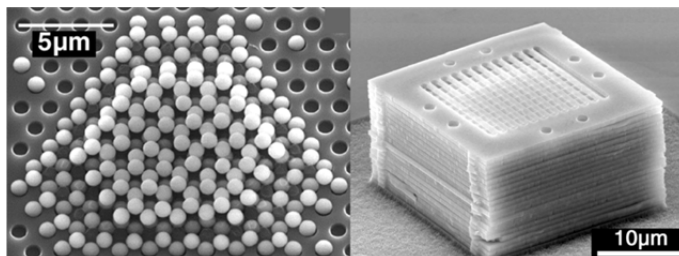


図1 代表的なフォトニック結晶[1,2]

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  $\mu\text{m}$ 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だ、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 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。

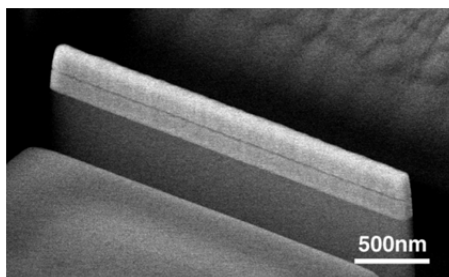


図2 プラズモンナノ共振器[3]

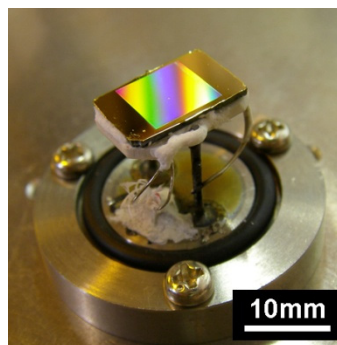


図3 赤外光源[4]



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).