

## ＜計画研究代表 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」

迫田 和彰(物質・材料研究機構)

私は1982年に東京大学物理工学科の修士課程を卒業し、企業の研究所に11年勤めた後、1993年に北海道大学に転出し、さらに2002年に物質・材料研究機構に異動しました。現職は先端フォトニクス材料ユニット長です。2005年からは筑波大学教授(連係大学院)を兼務しています。



大学院では花村榮一先生、大高一雄先生にご指導頂き、光物性の理論の基礎を勉強しました。当時は低次元結晶のパイエルズ転移や電荷密度波の研究が盛んで、これに関連してポリアセチレンなどの結合交代をもつ共役系高分子のソリトンの研究なども盛んでした。また、表面増強ラマン散乱(SERS)が関心を集めた時期でした。このような分野を一生懸命勉強したように記憶しています。数学にも少し興味があり、数学科にヒルベルト空間論の講義を聴きに行ったりしました。このことが、後のフォトニック結晶の研究で少し役立ちました。また、群論を田辺行人先生に教わりましたが、このことも後の研究でたいへん役立ちました。

修士論文では、SERSに関連した双極子輻射の計算を行いました。金属薄膜の近くに置いた振動双極子からの輻射の解析表示をヘルツベクトルの形で算出し、その中に現れる表面プラズモン(SPP)の分散関係を被積分関数の分母に含む積分を数値計算して、放射の角度分布を算出しました。数値積分の収束がゆっくりで計算にたいへん苦労しましたが、SPPの分散関係で定まる、特定の方向へ放射が集中することを示すことができました。このときは、こういった分野の計算はこの1回限りと考え、後にフォトニック結晶やメタマテリアルの研究に携わることになるとは思ってもみませんでした。また、当時カリフォルニア大学にいらっしゃった潮田資勝先生が実際にラマン散乱の実験をして下さり、実験と計算とが整合するとのことで一安心しました。その潮田先生が物質・材料研究機構の現理事長でいらっしゃって、また、本新学術領域のアドバイザーでいらっしゃいますが、SPPの計算から30年近く経って、再びお世話になっている次第です。

ソリトンの理論研究に関連して、ポリアセチレンなどの導電性高分子に関心があり、その分野の研究を行っている企業を探して就職しました。初めの2年ほどはそのような分野に関わり、磁気抵抗の測定などをしていましたが、3年目に当時の通産省から「光反応材料」に関する研究を受託することになり、その後はもっぱらこちらを担当しました。具体的に言いますと、光反応性の色素分子による高密度光記録の研究を行ないました。これは光化学ホールバーニングという原理にもとづくもので、記録波長の多重化によって高密度記録を実現します。そのためには色素分子がたいへん



鋭い吸収線をもっている必要があり、液体ヘリウム温度(−269℃)くらいの極低温まで記録媒体を冷却しなければなりません。それで、高温化が重要な課題だったのですが、温度特性に影響する要因はおおよそ分かっていたので、有望そうな材料をいろいろ試したところ、研究を始めて3年目頃に液体窒素温度(−196℃)ではたらく材料を見つけました。あいにく室温で機能する材料の発見にまでは至らなかったため実用化は達成できませんでしたが、この研究の過程で有機分子の光学特性や測定法についていろいろ学ぶ機会を得ました。

この委託研究が終了した時期に、故井上久遠先生からお招きいただき、北海道大学電子科学研究所へ転出しました。赴任当初は有機系試料の分光研究をしばらく続けるつもりでしたが、井上先生がフォトニック結晶の研究を始められた時期で、光波の分散関係の計算などを行う必要に迫られて、フォトニック結晶の理論研究にだんだんと関わるようになりました。ご存知の方も多いと思いますが、ヤブラノビッチとジョーンがフォトニックバンドギャップの概念を提唱する前に、大高先生が球面波展開による周期系のフォトニックバンドの計算をすでに行っていたらっしゃいました。この方法は、電子波のバンド計算で用いられるKKR(Korringa-Kohn-Rostoker)法をベクトル場に拡張したもので、たいへんエレガントな手法です。それで、井上先生が代表を務められたフォトニック結晶の特定領域研究で、大高先生と再びご一緒させて頂くことになりました。

私自身は最初、すでに知られていた平面波展開法でバンド計算をすることで実験研究のお手伝いをしていました。その折、(これは群論の応用問題ですが)モードの対称性が数値計算無しで判別できることに気づき、この当時話題になっていた、対称性のために光透過に寄与しないモード(非結合モード)が簡単に同定できることを見つけました。また、当時は透過スペクトルの計算も精度良くできない状況で、ペンドリーのグループからごく初期の計算が報告されていた頃です。それで、フーリエ解析を応用して2次元結晶の透過・反射・回折スペクトルを計算することを思い付き、実際に数値計算を行ってみたところ、フォトニックバンドギャップに加えて非結合モードの周波数領域でも、透過率が極端に減少することを初めて計算で示すことができました。

これと並行して、この頃に話題を集めていたもう一つの課題である、フォトニック結晶共振器(局在電磁モード)の計算に取り組みました。この当時はスーパーセル(共振器構造の周期配列)を対象に平面波展開でバンド計算することが主流でしたが、空間的に広がった平面波で局在モードを近似することに無理があり、精度の悪い計算しか報告されていませんでした。それで、いろいろ考えていたところ、北海道大学の中山恒義先生と矢久保孝介先生が、振動モードの解析で開発なさった手法を乱れのある導波路の電磁モードの解析に応用されているのを知り、このご研究にならって振動双極子を波源にもつマクスウェル方程式を離散化して、差分方程式を時間領域で解くことにより、フォトニック結晶の局在モードが共鳴状態として精度良く算出できることを見つけました。この方法は一般にFDTD法(時間領域差分法)と呼ばれるもので、計算電磁気学の分野では広く知ら



れていたのですが、私が Physical Review B に論文を書いた当時、うかつにもそのことを全く知らず、論文中にFDTD法という言葉を書きませんでした。その後、FDTD法はフォトニック結晶の光波伝搬の解析で主流となり、たくさんの計算が報告され、ソフトウェアも販売されています。こういった事情で、私の第1報はFDTD法によるとはあまり認識して頂いていないようです。

また、大高先生が導出された2次元結晶のグリーン関数を3次元系の場合に拡張し、これを使って小さな光の群速度による誘導放出、第2高調波発生、スクイーミングなどの増強効果を導きました。先に開発したフーリエ解析による透過率の計算で、誘電率に負の虚部を仮定すると誘導放出による光増幅スペクトルが計算できますが、数値計算でもグリーン関数による解析計算と整合した結論が得られました。

井上久遠先生の北大御退官と前後して、木戸義勇先生からお招きいただき、私は物質・材料研究機構に異動しました。物質・材料研究機構の前身である金属材料技術研究所で、今日、液滴エピタキシーと名付けられた量子ドットの自己成長法が1990年頃に開発されました。液滴エピタキシーは、AlGaAs 膜上の GaAs 量子ドット等、基板とドットの格子定数がほぼ等しい格子整合系に適用できる唯一の自己成長法です。格子整合系量子ドットはドット内に格子歪みが無い、ピエゾ電場が発生しない、等方的なドットを形成しやすく励起子の微細構造分裂が小さいなどの特長をもつことから、トリオンや励起子分子などの少数多体系の電子相関の研究にうってつけの素材で、励起子分子からのカスケード発光による量子もつれ光子対発生も期待されています。また、量子ドット一般に期待される、単一光子源や温度特性に優れたレーザーへの応用研究も進んでいます。

それで、GaAs 量子ドットを含むフォトニック結晶共振器をたくさんの皆さんにご協力頂いて作製し、顕微分光法で測定して頂きました。この分野で用いられてきた InAs 系ドットと比べて GaAs ドットの励起子発光波長が約半分であるため、フォトニック結晶の格子定数も半分にする必要があり、電子線リソグラフィによる試料作製は格段に難しくご苦勞をお掛けしましたが、パーセル効果による発光増強と蛍光寿命の減少を明瞭に示すことができました。

メタマテリアルについては、石原照也先生にお誘いいただき新学術領域研究に参加させて頂きました。試料作製も軌道に乗り、理論研究の端緒も得られたところです。研究計画や最近の成果については、ニュースレターの別の号で紹介させていただきます。