

＜研究紹介・自己紹介＞

研究項目 A02:公募研究

「MEMS駆動可変構造による光メタマテリアルの高機能化」

研究代表者 金森 義明（東北大学）

私は 1998 年に東北大学大学院の博士課程進学以来、現在に至るまで、羽根一博先生のご指導の下、光 MEMS やナノフォトニクスに関する研究に携わってまいりました。その前の東北大学大学院修士課程では故嵐治夫先生の研究室で宇宙太陽光発電のためのレーザエネルギー伝送に関する研究を行ってまいりました。また、2003 年 10 月から 1 年間、フランスの Laboratory of Photonics and Nanostructure (LPN/CNRS)



で Yong Chen 先生の研究室にお世話になり、ナノインプリント・リソグラフィを用いたナノフォトニクスデバイスの研究開発を進めてまいりました。

修士課程では、宮城県角田市にある航空宇宙技術研究所角田宇宙推進技術研究センター（現 JAXA 角田宇宙センター）の敷地内に地上 500m 間レーザエネルギー伝送実験システムを構築し、送光側のプレハブに設置された CO₂ レーザの光線を軸外し放物面鏡で反射させ、500m 離れた受光側のプレハブ小屋をめがけてエネルギー伝送実験をしていました。レーザや光学の基礎はこの時学びました。500m 先に光を合わせこもうとするとかなりシビアな光軸調整が要求されます。また、レーザ光は直進性に優れているのですが、大気中を 500m も進むと、温度、湿度、風、地形などの条件で受光側でのビーム位置に大きな変動が観察され、ビーム断面プロファイルもひどくなります。そのような現象を測定し、説明できる光学モデルを構築し、特性を明らかにしていきました。当時は 500m 間を何往復も走って実験をしていたので、体もスリムでした（笑）・・・。

修士から博士課程に進学するにあたり、光利用のスケールが宇宙からマイクロ・ナノと極端に変わりました。博士課程で取り組んだテーマが、サブ波長格子(入射波長より小

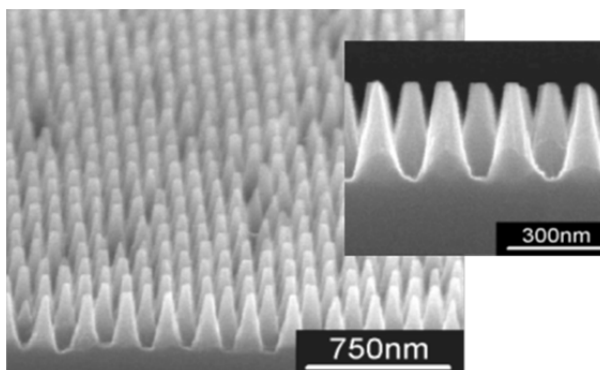


図 1：サブ波長反射防止構造

さい周期構造)による反射防止構造(図1)に関する研究でした。東北大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー(現マイクロ・ナノマシニング研究教育センター)の微細加工装置等を使用し、様々な反射防止構造を試作しました。また、市販の数値計算ソフトがなかった当時、大阪府立大学の菊田久雄先生に教えていただきながら3次元RCWAプログラムコードを開発し、東北大学のスパコンで数値計算を行うことができました。実験値とRCWAによる理論値を比較してみると、非常に高い精度でスペクトル特性が一致することに驚きました。次にマイクロアクチュエータを用いて構造体を機械的に動かす、MEMS駆動光フィルタの研究に取り組みました。なかでもナノフォトニクス構造をMEMSアクチュエータで可動させる技術は、

光MEMS分野の中でも新しい試みです。サブ波長構造は構造由来の光学特性が顕著に表れるので、構造変形により光学特性を制御することが可能になります。フォトニック結晶・導波モード共鳴格子・メタマテリアル等ではわずかな構造変化で光学特性が大きく変化します。例えば、可動フォトニック結晶や可動サブ波長格子によるチューナブルフィルタを開発しました(図2, 3)。これらのデバイスはMEMSアクチュエータをわずか $1\mu\text{m}$ ほど動かすだけで光学特性が大きく変わります。最近、構造色利用カラーフィルタの研究を行っております(図4)。

この研究成果を第3回東北大学光科学技術フォーラム(2010年)で発表したとき石原照也先生に初めてお会いし、そのときにい

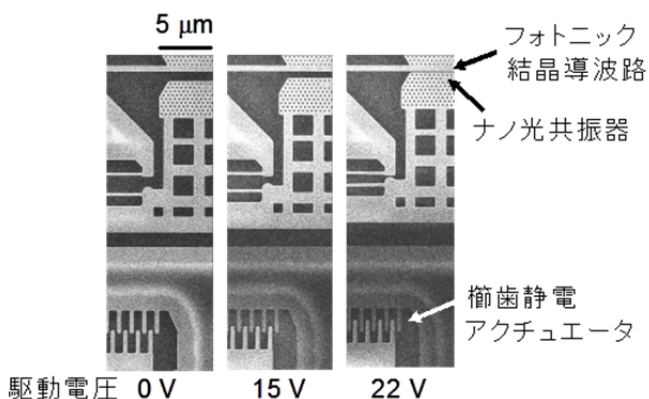


図2: 可動フォトニック結晶ナノ共振器によるアドロップ光回路

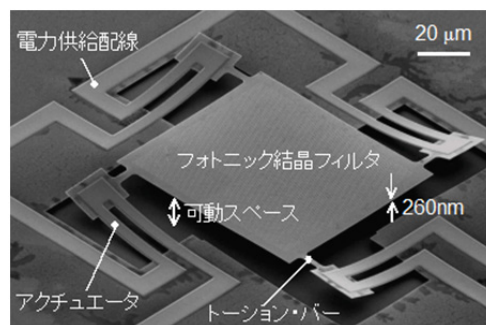


図3: 可動フォトニック結晶によるチューナブル共鳴反射フィルタ

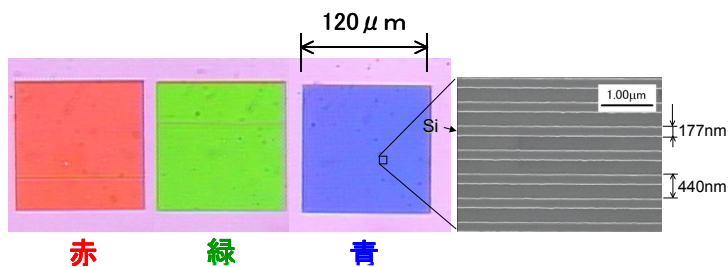


図4: 構造色利用カラーフィルタ



ろいろ質問をしていただきました。石原先生とのご縁をきっかけに、メタマテリアルに興味を持つようになりました。

現在は、公募研究テーマになっておりますMEMS駆動可変構造による光メタマテリアルの高機能化の研究、および、新規の光MEMSとナノフォトニクスデバイスの研究開発に鋭意取り組んでおります。

<研究紹介・自己紹介>

研究項目 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」

研究分担者 澤田 桂 (理化学研究所)

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」の研究分担者の澤田桂です。私は、メタマテリアルの物理について、理論の立場から新現象を開拓すべく研究を行っています。自己紹介および研究内容の紹介を通して、どのような考えでメタマテリアルの研究に取り組んでいるかを述べたいと思います。

私は、2001年に東京大学工学部の内野倉國光先生の研究室に配属され、量子スピン系の実験に取り組み、物性物理の研究へ足を踏み入れました。研究を通して物性理論に興味をもつようになり、修士課程からは永長直人先生の研究室に進みました。物性理論の研究室でしたので、まわりはみんな固体の電子論の研究をしていました。物性物理では、主役は物質あるいは電子ですので、光は電子に対する外場として取り扱われます。しかし、光と電子の相互作用という点では、光と電子のどちらが主役か外場かの区別はありません。そこで逆に光を主役に据えて、電子を光にとっての外場



共同研究者との
ディスカッション

とみなしたらどうか?と考える、研究室で一人だけ光学の研究をすることにしました。とはいえ、研究室で耳に入る話は物性物理のことばかりですから、その特色を生かすために、電子と光とのアナロジーを切り口にしようと考えました。固体物理にも光学にも共通するものとして、周期系でのブロッホ関数があります。そこでブロッホ関数の性質に目をつけて、フォトニック結晶を勉強しました。磁性などの物質の性質と、光の伝搬の様子とが絡み合うような系に興味があったので、修士論文では磁性体を用いたフォトニック結晶での磁気光学効果について考察しました。博士課程からは、さらに特殊な磁性体としてマルチフェロイックスを使った光学に関心を持ちました。光学においては、物質は外場の役割を果たしますから、マルチフェロイックスのような特殊な物質を使えば新しい光学現象が見つかるかと期待しました。例えば、光は電荷をもたないこと



から、光に対して外部磁場を印加しても光子がローレンツ力を受けることはありません。そこで、マルチフェロイクスのドメイン壁を使うと、実効的に光に作用するローレンツ力が出てくると発見できたときは、直感の通りの計算結果となって感動しました。また、マルチフェロイクスを使ったフォトニック結晶に関する計算は、十倉好紀先生の実験グループの結果と一致して安心しました。このように実験グループと常にディスカッションを重ねながら研究できたことは非常に有意義で、理論と実験とが協力し合う大切さを実感しました。その後、さらに研究対象を広げて、フォトニック結晶中の光と結晶中の X 線は同じ波動方程式に従うことに着目して、物性理論で有力な手法となっていたベリー位相による理論のアイデアを X 線回折理論へ応用することを考えました。その結果、X 線のビームが結晶歪みの 100 万倍もの横すべり現象をするという理論式を得ました。このように、理論では X 線や可視光などと光の波長領域は自由に行き来できるため、波長に応じた物質の特徴を活かせるのが大きな利点だと思っています。

2007 年に大学院を卒業して、理化学研究所の播磨研究所（スプリング 8）に移りました。石川哲也先生の研究室に所属し、X 線の実験グループの中で一人だけ理論の研究をしていました。理論家と実験家は、同じ現象に対しても視点が異なるので、毎日実験家と議論できる環境にあることは、研究そのもののみならず視野を広げる点でも幸せなことです。そうした日頃の議論から、学生時代の X 線の理論結果を実験していただくことになり、自分でも半信半疑だった理論予測が証明されて、とても感激しました。その上、理論の段階では想定しなかった良い結果も実験では得られて、理論だけからは見えていないことも多く、何事も実験をしてみないとわからないものだ実感しました。そんな中、東北大学の石原照也先生に声をかけていただき、メタマテリアルの研究会に参加するようになりました。メタマテリアルの研究における伝送線理論によるアプローチには目から鱗でした。光と物質の相互作用ではイメージしにくかった過程が、電気回路で考えると明快に理解することができるなど、思考の幅が広がりました。さらに、物性物理で研究されているのと同様の系がマイクロ波の回路でも研究されていることなどを知って、全く異なる出発点から始まっているのに類似の系を研究していることに驚くとともに、物事を多角的に見て理解を深めるヒントとなりました。そして何より、様々な波長領域あるいは他分野の先生方が集まり、活発に議論できることがメタマテリアル研究の大きな特徴



です。研究会では深夜に及ぶまで議論が盛り上がり、普段の研究発表の場ではなかなか聞く機会のないような素朴な疑問や直感的な理解の仕方などをぶつけあうことができ、そうした何気ない話題から新しい研究テーマが生まれることもあり、いつも楽しみです。

メタマテリアルでは、光学で見ると誘電率と透磁率、伝送線で見ると容量性と誘導性、のように2つ以上の性質の共存が重要ですが、これはマルチフェロイックスにおける誘電性と磁性の両方が織り成す性質に似ています。そこで私は、マルチフェロイックスとメタマテリアルとのアナロジーに着目して研究を行っており、新現象の模索とともに様々な現象を統一的に理解する枠組みの構築を目指して、日々取り組んでいます。私は、理研では X 線自由電子レーザー (XFEL) の理論の研究に携わっておりますが、XFEL を議論する上でも、メタマテリアルの研究を通して知った伝送線理論の考え方は非常に役立っています。XFEL の光学現象を等価回路で置き換えて考えることは、単なる形式的なアナロジーだけではなく、物理の理解の助けになります。私の研究対象は現在では X 線から可視光さらにはマイクロ波までに及び、それぞれの波長領域で実験家の先生方と議論を重ねながら研究を進めています。私は様々な分野にまたがって考えることができることが理論の研究のメリットだと思っており、メタマテリアルはまさにそうした場を提供してくれています。また、メタマテリアルで人工構造による巨視的な「原子」や「分子」の光物性を議論する際に、光と物質の相互作用や電磁気学を基礎から見直す必要が出てきました。これらは X 線で (本来の) 原子・分子の光学応答を考える際に問題となるもので、XFEL の研究にとっても重要なことなのですが、私個人としては、高校生の頃からずっと積然としていなかった疑問でもあります。自分の中で長年の疑問だった基礎的な題材が今の研究の場でも現れてくることにも感動の毎日です。



<研究紹介・自己紹介>

研究項目 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」

研究分担者 大野 誠吾 (東北大学)

計画研究エにて石原先生のもとで研究分担者をいたしております大野と申します。私は 2006 年東北大学で博士課程を修了後、3 年間、理化学研究所 (仙台) で研究員として働きました。2009 年から東北大学の光物性物理研究室に勤め始め、現在に至ります。自己紹介としてこれまでどんなことを行なってきたか振り返り、研究紹介として現在興味を持っている点をあげてみたいと思います。学生のころは齊官清四郎先生のもと、レーザーを用いた誘導ブリルアン分光装置の開発とそれを用いて結晶中の超音波減衰 (フォノン・フォノン散乱) について研究しておりました。ブリルアン散乱は物質中の音響フォノンによる非弾性光散乱でそのスペクトル線幅から減衰率の情報が得られます。結晶中の超音波 (~10 GHz) の減衰を議論するには、高いスペクトル分解能 (~10 kHz) と測定感度が必要で、レーザーの周波数取得方法や変調方法などレーザー分光の手法を駆使し、誘導ブリルアン分光装置を開発しました。常温では結晶中を伝わる音響フォノンはほとんど伝搬せず、シンプルなローレンツ関数で近似できるブリルアンスペクトルですが、低温では音響フォノンの伝播距離が長くなり、音波のエネルギー伝播方向の情報やサンプル形状、レーザービーム形状などマクロな情報がスペクトル形状に大きく影響を与えます。このようなスペクトルの変化はブリルアン分光法の精度が高くなって見えてきた変化です。波の伝搬とスペクトルの関係について研究していたことが私の中ではメタマテリアルでの変わった波の伝搬への興味につながっているのかもしれません。

理化学研究所では伊藤弘昌先生が率いるテラヘルツ光源研究チームにて研究を行い、レーザーの下方変換技術を元にしたテラヘルツ光源の開発とその応用がチームの主なテーマでした。私は、有機非線形光学結晶 DAST 中の差周波発生によりテラヘルツ光を発生させる光源 (DAST-DFG 光源) の開発と応用に携わりました。DAST-DFG 光源の特徴は励起用の赤外線 2 波長を独立に選び、DAST 結晶に入射することで 1-40 THz の間で好きな波長のテラヘルツ光を出力できることです。また、その波長は、励起光の繰り返しパルスごとに切り替えることができます。これらの特徴を半導体ウエハーのキャリア密度分布評価に



活かすことが私に与えられたミッションでした。見た目にはなんの変わりの無いウエハー表面でもキャリア密度の面内分布によってテラヘルツ帯のスペクトルが変わって見えるのは私にとって衝撃的でした。また、副次的な研究でしたが DAST-DFG 光源からテラヘルツ光出力特性とにらめっこしているうちに、出力スペクトルの形状が DAST 結晶自身の情報を含んでいて、そこからテラヘルツ帯の光学特性（屈折率スペクトル、吸収率スペクトル）が抽出できることもわかりました。このことは DAST-DFG 光源という装置の特色があつてこそ、見えてきた特性でした。学生の頃と研究の目的は大きく変わりましたが、こうして振り返ってみるとなにか新しい特徴をもった装置を開発するとそれにより、これまで見えなかったものが見えてくるという点では学生の頃の研究スタイルと同じでそれが性に合っていたのだと思います。

現在、石原照也先生のもとで、メタマテリアルの研究に携わっております。石原グループがこれまで研究してきた人工構造における光誘起起電力に基づき、私は金属誘電体メタマテリアルのもつ非線形光学応答について研究をしております。特にメタマテリアルからのテラヘルツ光発生、及び、そのプロセスの解明が目指すところです。これまで、光誘起起電力の時間応答はナノ秒のパルスレーザーに追従することが明らかになっており、それがどこまで速く応答するか、もしフェムト秒レーザーのパルス幅に追従すると空間を伝わるテラヘルツ波のモードと結合しうるのではないかと、というのが興味深い点です。現在までのところ数値シミュレーションにより、非対称金属グレーティング構造内のできる電磁場分布を求め、そこから計算される分極からテラヘルツ光の出力特性を調べたところ、0-50 THz の範囲で良好な出力特性が期待できることがわかっております。

テラヘルツ光を発生させるのに、様々な手法が取られておりますが、いずれも発生させる材料の影響で広帯域にフラットな出力特性を実現するのは難しいようです。このことはテラヘルツ帯特有の問題で、この帯域は、物質固有の振動モードを持つことから多岐に渡る分野への応用が提案されておりますが、逆にテラヘルツ帯全域にわたってフラットな特性を示す物質はダイヤモンドなど一部の材料を除いて殆どありません。メタマテリアルという人工的にデザインできる系でテラヘルツ光が発生させられれば、それらの影響を乗り越えられるかもしれません。

メタマテリアルとテラヘルツ光というキーワードでは、テラヘルツ帯の構造



は光波帯に比べてスケールが大きく作製が容易という点に着目されており、私もその恩恵にあずかって研究している一人です。一方で、テラヘルツ帯の光源の研究に携わった立場からメタマテリアルに期待する点として、光学素子の拡充があります。テラヘルツ光を測定のプローブとして活かそうとした場合、そのための光学素子が不足しております。メタマテリアル（もしくはより広義に人工構造）は新しい光学素子の材料として期待されておりますが、光波帯よりもその役割が大きいのがこの帯域だと感じております。