

## <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?と考えると、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。