



令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)

2.5次元物質科学： 社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト

光が照らす2.5次元物質科学

A03班 分析班 研究代表者
(2.5次元物質の光技術と機能創発)

松田 一成

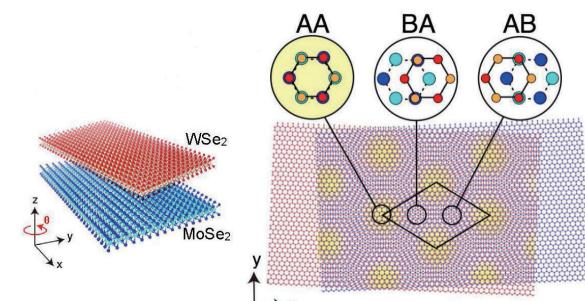
京都大学
エネルギー理工学研究所

先生は元々、どのようなご研究をされていらっしゃいましたか？

松田 カメラのフラッシュの原理と同じように、光を使うと一瞬の物理現象をストロボ写真のように捉えることができます。名古屋大学工学部応用物理学学科で、レーザー光を使って物質中でピコからフェムト秒($10^{-12}\sim 10^{-15}$ 秒)の極短時間に起こる、光でつくられた電子の動きを明らかにする研究で学位を取りました。そういう意味では、今までずっと一貫して「光が照らす物質科学」に関する研究を進めています。2003年から京都大学の宇治キャンパスの化学研究所で助教授(准教授)として勤め、そのタイミングでカーボンナノチューブに関する研究をスタートしました。その後、2011年から現所属である京都大学のエネルギー理工学研究所に教授として、2012年頃から二次元半導体の研究をスタートしました。それがベースとなって、今の2.5次元物質科学の研究に繋がっている、そのような感じですね。

二次元物質に興味を持ったのはなぜですか？

松田 「たまたまそこに山があったから山を登る」みたいな話が、純粋な動機なんすけれど(笑)。もう少し学術的な話をすれば、物理を専攻する学生なら必ず量子力学を習いますが、そこで「狭い空間の井戸(型のポテンシャル)に電子が閉じ込められるどうなりますか」という例題を、練習問題として解きます。カーボンナノチューブや二次元半導体は、狭い空間の中に電子が閉じ込められているという意味では共通していて、電子の波としての振る舞い、つまり量子力学的な性質が顕著に表れてきます。まさに、教科書で描かれているような美しい物理が現実に存在している。そういうところからですかね。



2層のTMDCによるモアレ縞の模式図

そこから「2.5次元物質」を研究しよう、となつたきっかけは何でしょう？

松田 さきほどお話した通り二次元物質は、我々人間から見ると自然にできた極めて理想的な物質システムと言えます。それら二次元物質の層と層を重ねたり、回転させ揃ったり、貼ったりして、自然界にないものを生み出すことができます。我々自身も2015年頃から、まずは単純に二次元の半導体と半導体、次に半導体と磁性体を重ねて貼り合わせた系からスタートしました。それで、例えば層と層とを回転させ重ねても、理想的には間に挟まつた電子は、均一な波として振る舞うものと思っていました。ですがやはり大きかったのが、海外のグループからグラフェンでの超伝導、また、2019年末に半導体と半導体を揃じて重ねると現れる光学現象で、いずれも「モアレ縞」と呼ばれるものが関わっていることが報告されたことです。このモアレ縞のおかげで、電子の波は決して均一ではないのだと。特に、我々はこのモアレ縞ができることで電子の量子性が最大限使える、量子ドットという電子の箱がきれいに規則的に並んだものという、美しい物理の対象でできるのではないかと思った事が強い動機です。

「モアレ縞」って、印刷物だったり画像処理でよく聞く言葉ですか？

松田 そうです、それと同じです。二つの間隔の違う縞を重ねると現れる独特の縞模様のこと、「モアレ」という言葉はフランス語が語源らしいです。そのようなものが物理として大事だとは思っていましたが、ふと子供のころに受けた、モアレ縞を利用した背骨のゆがみ検査のことを思い出しました。

モアレ縞はとてもセンシティブで、微妙な具合で形も変わると周期も変わります。だから、ちょっと背骨が曲がっていたり、バランスが悪いと顕著にわかるそうです。これは物質の中でも同じで、今、二次元半導体を揃じて重ねたもので観察していますが、モアレ縞が場所によってばらついています。いかに均一にするかもこれから課題かもしれません。

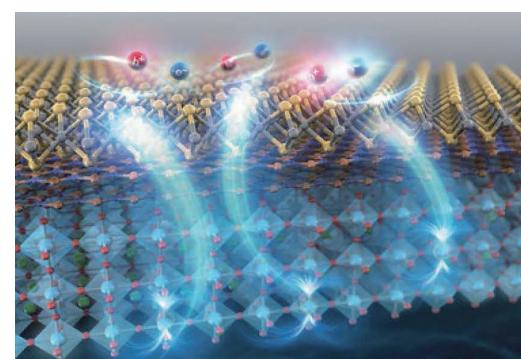
先生の所属していらっしゃるA03班とは、どのようなポジションに当たるのでしょうか？

松田 ちょうどプロジェクトの中で、真ん中の立ち位置つまりハブなんです。A01,02班の皆さんを作ったものを我々が新しい方法で調べて、そこでわかった構造や物性情報をA04班に繋いで、最終的にA05班の応用につなげていくというものです。例えば、2.5次元物質に対して私は光計測を専門としていますが、班の中には電子顕微鏡が専門の方や、さらにはX線回折や光電子分光法のメンバーもいます。それぞれの得意とする分析手法でアプローチし、2.5次元物質の新しい物理さらには機能や応用につなげていく事が班の役割です。

その中で、我々のグループでは、この2.5次元物質での新しい光科学とその応用を目指しています。特に、「バースピン」という物理自由度があるのですが、それと先ほどの「モアレ」の物理を組み合わせて、フォトニクス応用に繋げていこうとしています。

バースpinとはどういうものなのか、もう少し詳しく教えていただけますか？

松田 はい。今のコンピューターはエレクトロニクスが基礎となって、電子の有無で演算しています。ですが、原理的にジュール熱発生によるエネルギーロスが避けられません。そのため、電子の自転(スピinn)の自由度を使うスピントロニクスに関する研究が進められていますが、ここではスピinnだけでなく「バースpin」という自由度を使って、新しいエレクトロニクスやフォトニクスを切り拓こうとしています。このバースpinは、二次元半導体で初めて出てきた物理概念なんです。



2.5次元物質によるバースpinのイメージ図

そうなのですか？それはどうしてですか？

松田 物理的な説明になりますが、空間的な対称性が破れています。重い元素を含んでいてスピン軌道相互作用が強い、という二つの要素を満たしたケースだけバースpinという自由度が生じます。その二つの条件を満たす物質は、これまで二次元半導体が出現するまでなく、物理として新しい側面を持っています。また、電子の自転(スピinn)は、光では制御しにくいですが、バースpinは光で制御ができます。

それで、今まで我々が扱ってきた光とバースpinにこのモアレの物理を組み合わせて、バースpinフォトンクスと呼んでいる新しいフォトニクスを2.5次元物質で切り開きたいと考えています。

最後に、今後の展望について一言お願いします

松田 そうですね。いろんな側面があるんでしょうけども。せっかく皆さんでグループを組んでオールジャパンでやるので、この領域でしかできない、この領域だからこそできる、そんな研究を一緒にできればと考えています。やはり、この領域でしか会えなかった人たちと一緒に研究することで、相乗効果として新しい研究ができるに意義があるのかと思っています。加えて、ターゲットとなる物質も新しいし、コンセプトも新しいですから。今後新しい研究成果がこの領域から次々出るのではないか、そう大きく期待しています。

Interviewee



松田 一成

京都大学
エネルギー理工学研究所
教授

領域ホームページ <https://25d-materials.jp>
(ニュースレター公開日:2022年8月30日)