



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

計画班メンバー特別対談 4

A03班

分析班 研究分担者

(2.5次元物質におけるバンド構造の直接観測)

坂野 昌人

現在の主な研究を教えてください。

坂野 角度分解光電子分光という特殊な実験手法を用いて、2.5次元物質の電子構造を研究しています。物質の性質というのは、主に電子がどのように物質中で広がっているかによって決まります。光電子分光という実験手法は、物質に光を当てて飛び出してきた電子を調べることで、その物質の電子状態を調べることができる手法です。二次元物質を重ねて作る2.5次元物質は、構成要素である二次元物質が単独では発現し得ない物性が発現するところが面白いです。その時の電子構造は大変複雑で理論的に再現することが困難です。それに対し私たちは実験による直接観測でアプローチしています。複雑な2.5次元物質の電子構造を計測して、どのような性質を示すかを実験的に解き明かしています。

笹川 僕の研究室では、単結晶試料の作製、第一原理計算、極限環境での計測の三つを組み合わせ、エキゾチックな量子物質、電子物性の開拓を行っています。物質科学という分野で、物を作るところの化学、性質を理解しようという物理の狭間にあるような、かけ合わせたような分野です。この分野において、量子の世界で発現する非従来型の超伝導やトポロジカルな電子物性などに注目しながら研究を進めています。着目しているこれらの現象は、三次元における量子的な性質として端的に表れます。そのため現在の研究では、ナノや低次元と相性のよい量子現象と、三次元で元々出てくるような量子現象が融合した部分として、2.5次元量子物質やその科学の追求を行っています。

これまで取り組んでこられた研究についてお話しいただけますか？

笹川 僕自身の研究の出発点は層状銅酸化物で発現する高温超伝導で、博士号もそのテーマで取得しまし

A04班

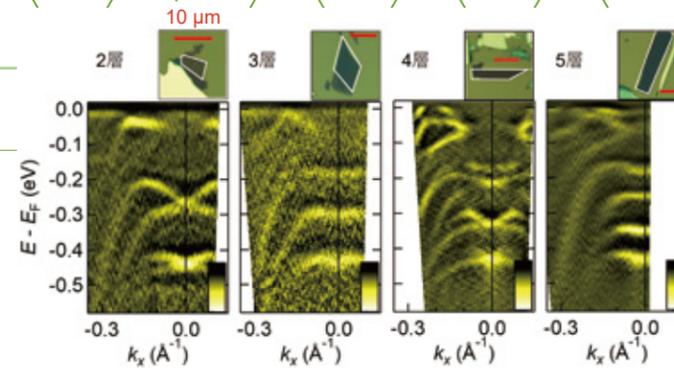
物性開拓班 研究分担者

(結晶成長(トポロジカル物質、超伝導物質)を駆使したエキゾチック物性開拓)

笹川 崇男

た。その頃は限られたいくつかの物質だけを対象とし、それらを徹底的に分析、実験的に解明しようというアプローチで強相関電子系を研究していました。その後、東工大で材料や物質の研究を推進している研究所で研究室を持つようになり、それと同時期にトポロジカル電子物質が発見されました。トポロジカル物質とは、例えば中身と表面が全然違う電子状態を示す物質で、トポロジカルな性質を持つかどうかを知るには理論計算が必要です。それまで趣味的に第一原理計算をおこなっていましたが、それがとても役立ちます。さらにトポロジカル物質を研究するには単結晶も欠かせません。そこで計算と単結晶を武器にしなが、多種多様な物質を網羅的に研究していくスタイルに変えていきました。とにかくたくさん単結晶を作りまくって、その性質、トポロジカルな電子状態を見つけようとしている中で、三次元から二次元に向かうのに適したファンデルワールス力で積層した物質をたくさん扱いました。さらに積層していたものから薄くしていくと性質が大きく変化するものも多分と分かり、それで2.5次元物質科学に本格参入し始めたという流れになります。坂野さんとは、この網羅的に研究している中で出会っています。

坂野 そうですね。学生時代から笹川先生とよく共同研究をしていました。当時は三次元バルク物質を研究対象としていて、物質の結晶構造と電子構造、スピン構造の関係性にすごく興味を持っていました。私たちの研究室では結晶を作っていなかったため、笹川先生やいろいろな方から多種多様な試料をいただいていたました。それらの関係性を対称性の観点から読み解いたり、電子構造の計算のシミュレーションをして調べたりしていくうちに、だんだんと自分で電子構造の対称性をデザインすることに興味をわいていきました。その後、二次元物質の積層技術に関する発表に触れる機会があり、これまで積み上げてきた研究手法と知見を活かせそう



上：測定に用いた2~5層 WTe₂フレークの光学顕微鏡写真
下：得られたそれぞれの角度分解光電子分光像(坂野)

だなどと思、この分野に参入しました。

笹川 僕と坂野さんの共同研究は、論文が出たのは2015年で、僕らのところでトポロジカル超伝導体の有力候補物質の単結晶を作り、彼が角度分解光電子分光で測り、第一原理計算を使って電子構造を理論的に描いたものと、彼が見た電子構造とを一対一で比較しながら電子状態を解明したことが出発点です。それから角度分解光電子分光の技術的な進歩があって、ビームをμmまで絞れるようになりました。かつて坂野さんからは大きくてきれいな結晶下さいって言われていましたが、今は大きさよりも1層まで薄片化できるような結晶を、とにかくたくさん下さいに変化しています。こうした中で、領域内で僕と坂野さんを含む複数名での共著論文(2022)を出すことができました。この時は5層、4層、と薄くしながら電子構造を見ていき、次は1層で180°回転させて重ねて…と進化は続いています。

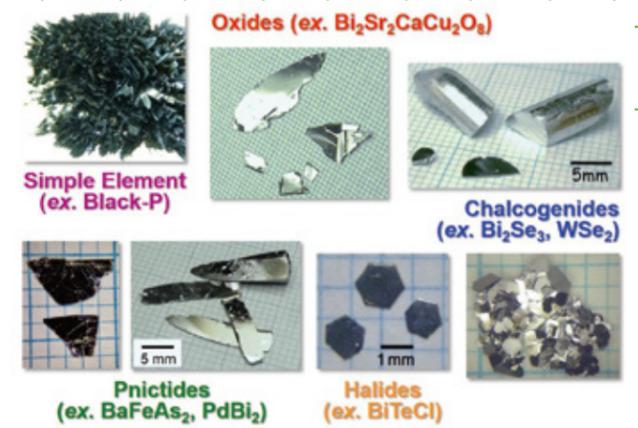
領域活動の中で感じたことをお聞きしたいです。

坂野 私は2.5次元物質科学のような研究グループに参加するのが初めてで、始まった当初は戦々恐々としていました。いざ始まってみると居心地がとても良くて驚いています。皆さん気さくで、共同研究に対してもウェルカムな雰囲気です。研究においても友達づくりが重要と仰る先生が多いのですが、その中にある本当の意味がようやく理解できてきたように思います。垣根を下げることや人づてに様々な技術や分野にいる方と繋がっていくことで、より研究が進んでいくことを実感しています。

笹川 原子層から出発して二次元から2.5次元に向かうアプローチが多いのかなと思っていましたが、僕のように三次元から二次元に向かう研究も後半は増えていますね。今、すごく分野の広がりを感じていて、二次元と三次元がとてもよい形で融合していています。2.5次元物質を研究するための技術も目を見張るような進歩があり、これまで夢や妄想くらいに思っていたことが、実際に現実で研究としてできる時代になっていると感じています。

坂野 わかります！細胞の1個より全然薄い二次元物質を持ち上げて重ねて角度も制御してって、実際にやってみると何もかもが難しいですね。蒲江さんのグループが曲げるデバイスを作製していて共同研究を行っているのですが、そういったことも実際できるんだと私も単純に驚いています。

笹川 2.5次元では一層では出てこない性質を、ひねって重ねたり、違う化学組成のものを重ねたりするこ



2.5次元物質科学に三次元から迫るための出発点：
多種多様な単結晶試料(笹川)

とで作り出す、そんなことが可能になって感動をおぼえているってそういう感じです。さらに単に電極つけるだけじゃなくて、どういう角度で重なっていて、力を受けて原子が再配列しているなど、そこまで全部精密に分析できるようになってきている。技術革新がすごいなと思っています。今後は何が起きているかを明らかにすることや機能につなげることも必要なので、電子状態を直接見ていく坂野さんの研究は重要になると思います。

坂野 ありがとうございます。後半からは私よりも若い方が入ってこられて、私ももう若手と言えない頃なのかもしれないですが、若手として何とか踏ん張って食らいついて、いい成果をどんどん出していきたいです。

私のグループは電子構造の直接観測が得意です。いろいろな方とのコラボレーションを進めて、新たな現象の起源解明や新材料の開発など、想像を超えるような研究を展開したいと考えています。例えば強誘電体、超伝導体など、他にもいろいろ共同研究していきたいです！

笹川 市販の単結晶のほとんどは、僕のところで用意できます。最近の領域会議で商用結晶との性能対決したデータをご覧いただきましたが、桁で良い物性をうちの単結晶試料は示しています。せっかくなので結晶があるので、市販のものを買わずにぜひお声がけいただきたいです！貴重な予算をセーブできますし、胸を張れる実験をしようっていうときに、お役に立てる部分が多いんじゃないかと思っています。



坂野 昌人

東京大学
大学院工学系研究科
助教



笹川 崇男

東京工業大学
(10月から東京科学大学)
科学技術創成研究院
准教授

(活動班順 敬称略)

ライター：柏田 百代(広報担当)

領域ホームページ <https://25d-materials.jp>

(ニュースレター公開日：2024年9月30日)