

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

# 総力戦で挑む2.5次元の未来

AO2班

集積化班 研究分担者  
共同利用拠点運営

(ファンデルワールス積層による集積構造の構築)

## 町田 友樹

東京大学 生産技術研究所

これまでの領域活動で  
印象深く感じた出来事は何でしょうか？

町田 2023年10月に複数班をまたぐ共同研究の論文を出版しました。ファンデルワールス積層でツイスト二層 $WTe_2$ を作製し、二層 $WTe_2$ における空間反転対称性<sup>\*1</sup>の有無がツイスト角によって制御できることを確認した内容です。この成果は物性探索の新しい手法を提案・実証したという点で非常に大きな意義を持っています。このように共同研究の成果が出ることはやっぱり嬉しくて、深く印象に残っています。

この共同研究は、潜在的にこういった実験ができたらいいなという考えがあり、それを実現できる技術を持つ方々との出会いがあって進みました。結晶は笹川さん(A04)からいただき、hBN(六方晶窒化ホウ素)は渡邊さん(A01)から、坂野さん(A03)のところでARPES(角度分解光電子分光装置)のデータを、TEM画像は高村さん(A04)、SHG(第2次高調波発生)は松田さん(A03)のところでとっていただきました。2.5次元領域のおかげで、たくさんのチームと一緒に研究が進めやすくなり形になりました。2.5次元領域の活動があってよかったと思う出来事です。

先生の2.5次元のテーマであるファンデルワールス積層について教えてください。

町田 原子層の積み上げ技術は、第1世代から第4世代まであります。第1世代はガイム博士とノボセロフ博士の2人がノーベル賞をとった、スコッチテープを使う劈開法です。第2世代では層状物質を重ねることができるようになりました。その方法は、まず透明基板上にポリマーを作り、その上にグラフェンを作ります。もう一方で、例えばhBNをシリコン基板上に作り、これを顕微鏡



研究室のグループ写真(2024.04)

下で位置合わせしてくっつけます。ファンデルワールス力が働き2つの層状物質を重ねたものが出来上がり、ポリマーを溶かすと完成です。第3世代は原子層と原子層をくっつけては上に引き上げることを繰り返す方法で、スタンプ法と呼ばれています。これをロボティックオペレーションにしたのが第4世代で、我々の技術です。

単原子層の積層を手動で行うと、ノウハウがたくさんあったり、とても難しかったりして大変です。それをもっと簡単にしたい、そしてなるべく空気を入れたくない、それらを叶えるために空気が入らない環境で積層できるシステムを立ち上げました。全ての装置がグローブボックス(窒素ガス中)に入っていて、全てコンピュータで制御可能。手動で調整せず、押しつける強さも数値として記録・管理できる、そんなシステムです。さらに単原子層を顕微鏡で探す部分も自動化しました。顕微鏡をスキャンしてどこに単原子層があるか、その位置や大きさの情報をデータベースに記録します。それに画像認識技術をかけ合わせて、どこにどんな状態で、何の原子層があるか教えてくれるようにしました。そうやって見つけた原子層は、どの角度、どの順番で何を重ねるかを決めて、どんどん積層していくことができます。

これまでにないスピード感ですね。

町田 劈開法で作ると原子層はすごくランダムにできるので、使える部分はごくわずかでした。その極めて少ない使える部分を、今までは顕微鏡を使って人が見て探していました。この探索の部分に深層学習も利用しています。こういう原子層が欲しいとトレーニングセットにし、自動的に探してもらう。するとリアルタイムでコンピュータが教えてくれるので、すごく便利です。あとはコ

ンピュータが与えてくれたヒントをよく見て、実際に使うかどうかを判断していきます。

我々のロボティックオペレーションはスピードもメリットといえますが、高い品質のものが作れることが一番大事だと思っています。低いレベルの技術でもとりあえず形だけ作ってはできますが、本当にいいものでないと一生懸命計測しても意味がなくなってしまいます。高い品質のものでないと本当の物理が見えない、本当の性能が出ないという問題が起こります。ロボティックオペレーションを導入することで、例えば押しつける強さをきちんと制御する、引き剥がすときのスピードは何 $\mu\text{m/s}$ にするなど、そういった制御が可能になります。高品質なサンプルを1つ1つ、丁寧に確認しながら積み上げていくために、AIはアシストとして、ロボティックは再現性を持たせるツールとして利用しています。

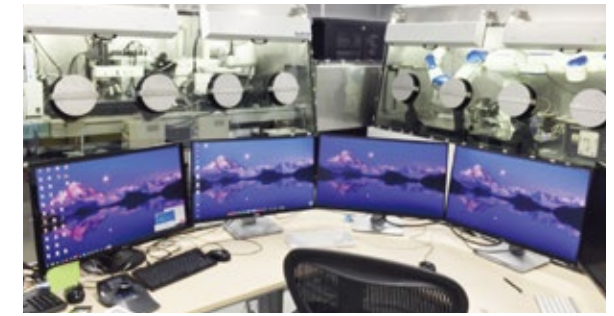
集積の共同利用拠点として、お伝えしたいことはありますか？

町田 我々の設備では、グローブボックス中でロボティック積層を進めることができます。そのため空気に弱い物質には特におすすめです。ツイスト角度を制御する必要がある場合も結構精度が高いので良いと思います。他には、例えば新しい物質の合成や結晶成長を進めていく中で何か新しい層状物質ができたとき、上手く単原子層にできないことがあります。我々のところにはある程度ノウハウがあるので、単原子層までできるかどうか試すことができます。積層に関しても作ってみたい組み合わせがあれば、これまでのファンデルワールス積層やポリマーのノウハウがたくさんあるので、ぜひうちに来て一緒に作ってみましょう。ウェルカムなのでどんどん提案して下さい。

領域の活動では、先生方独自の技術や設備をオープンにし、協働的に進めていらっしゃいますね。

町田 日本は一時期、原子層の分野でずいぶんと世界から遅れてしまいました。グラフェンの理論では世界をリードしている人がいたけれど、実験の部分はすごく遅れてしまって。私のところは2007年から参入しましたが、その頃日本でグラフェンを作れていたグループはほとんどありませんでした。その後2.5次元の前領域である「原子層科学」の成果もあり、世界にだいたい追いつくことができました。そして第4世代あたりから、リードする場面も出てきているという状況です。欧米でグラフェンの研究が進んでいた頃、日本ではカーボンナノチューブが盛んでした。グラフェンという新しいカーボンナノ材料が出てきたとき、日本の研究者達はすぐには飛びつかなかった。そんな風にこれまで研究してきた1つのことをじっくり進めていく良さもあります。一方でフットワーク軽く飛びついて、世界と競争しながらやってくのも大事です。

この原子層分野はベースとなる元素が約50種類。その中から何を選ぶか、そして積層の順番、積み上げる角度と、様々な組み合わせ方があります。その中には、例えば



ファンデルワールス積層システム

グラフェン自体は超伝導でないのに、グラフェンとグラフェンを積層すると超伝導になるような“お宝”が含まれているのです。このように、組み合わせ方によっては1+1=2以上になるケースがあるということが分かっています。何をどのように組み合わせると何が起こるのかという可能性の幅が広く、まるで宝探しのような分野。この広い可能性の中から2.5次元というプロジェクトを通じて、皆で宝探しを進めていきたい、そして世界と戦っていきたくと思っています。そのためにもメンバーそれぞれの技や武器を持ち寄って、技や武器の優秀な使い手を増やしたり、お互い補い合ったりできるよう、協働的に進められる仕組みを整えているのです。

宝探し、まさに冒険ですね！  
旅の間でも皆様メッセージをお願いします。

町田 日本人は海外の研究者に比べて奥ゆかしいし、自分のところで何とかしなきゃと思いがちです。最近作製技術の論文を出したところ、日本からの問合せより海外からの方が多くありました。リケンラップどこで手に入るんだ、送ってくれって(笑)。なかなか日本人はそんな風に積極的にいけませんよね。だからこそ、この2.5次元領域のように、たくさんのチームが集まるプロジェクトがあることはすごく大事です。せっかく領域のメンバーになったのなら、共同利用拠点を使ったり、既に技術を持つて人と繋がったりして、共同研究をどんどんして欲しい。そうすることで日本の研究が進み、世界を凌駕する成果に結びつくのではないかと考えています。

用語説明

\*1 空間反転対称性: 実空間で基準点に対して反転する操作を空間反転という。結晶構造の反転対称性はスピン軌道相互作用やバンド構造などの物性に大きな影響を与える。



町田 友樹

東京大学  
生産技術研究所  
教授

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5月23日)