

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 5

A03班

分析班 研究分担者

(最先端電子顕微鏡を用いた
2.5次元物質の原子レベル構造解析)

末永 和知



A03班

分析班 研究分担者

(先端放射光X線回折による2.5次元物質の構造評価)

西堀 英治

現在の主な研究を教えてください。

末永 現在は特に、電子顕微鏡自体の発展と最先端の試料を見る研究を行っています。我々が扱う試料の多くは結晶という、原子が周期的に並んでいる材料が多いのですが、その周期性が壊れている、予想と異なるものが入っている、欠陥があるなどを原子1個の感度を持つ顕微鏡で確かめています。さらに原子1つ1つの並びを見るだけでなく、同時に分光も計測できる電子顕微鏡を開発中です。このように電子顕微鏡の性能自体を向上させながら、思いもよらない結晶の乱れをしっかりと確認していくことを研究の目標としています。

西堀 放射光というX線の中でもかなり強い光を使って原子や電子を見る研究を進めています。末永さんのように対象の1か所を直接見るのではなく、全体の中での平均的な並びを解析しています。それにより、100万個程の原子が並ぶうち、1/1,000の頻度で欠陥があるなどが分かります。研究で利用しているのはSPring-8やSACLA*です。SPring-8は兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高性能の放射光X線を生み出すことができる大型放射光施設で、実験室光源よりも6~7桁強いX線を使うことができます。光が強くなると見えなかったものが見えるようになり、電子1個のスケールを見る、大雑把で構造も分からないものを調べることが可能です。そのためSPring-8では物質同定・構造決定を、時間分解が可能なSACLAでは電子・原子の動きの可視化を、物質にはとらわれずに行っています。

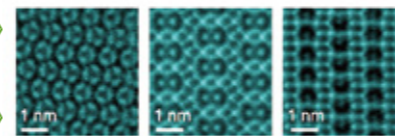
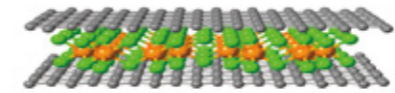
これまで取り組んでこられた研究についてお話しいただけますか？

末永 大学院の時から電子顕微鏡の研究室におり、電子顕微鏡の基本的なことを学びました。一番大きな転機があったのはフランス留学中のポストドクの時です。電子

線を使った分光器との出会いが衝撃で！試料を見ていると、何の元素があるかリアルタイムでスペクトルがどんどん出てきたのです。初めて生でスペクトルが変化するところを見て、こんなに面白いものがあるのかと思ひ、すっかりはまってしまいました。それからもう30年近く、ずっと同じことばかりやっています。

留学中に様々なことを学び日本に戻ってからは、分光器を開発する仕事をスタートしました。当時の日本は、電子顕微鏡は進んでいきましたが、電子分光に携わる人があまりいませんでした。NEDOやJSTなど色々なところに出資してもらいながら、解明したいことに近づけるような電子顕微鏡と電子分光器を作り続け、現在に至ります。自分でも時々びっくりしますが、30年前と似たような試料を似たような分光器で調べると、この30年での進歩がとてもよく分かります。学生の頃、電子顕微鏡でカーボン原子1個を見ることは、もう夢で、見えないうちかと思っていました。それから何十年も経ち、電子顕微鏡の技術、分光器も検出器も発展し、今では当たり前のようにカーボン原子1つ1つが見えて分光もできています。感度も上がり、見えなかったスペクトルをとらえることができ、分解能も上がりました。同じことをずっとやっていますが、大きな進歩を間近で見てきたかなと思います。これからも最先端にいたいですね。

西堀 私もずっと同じことを続けていて、放射光を使った研究を学生時代からずっと行っています。助手に着任した時にちょうどSPring-8ができ、それから25年以上、SPring-8を使った研究を続けています。SPring-8は、それまで人類が使ったことのない程の強いX線を出す施設で、最初は使う人がとても少ない時期がありました。あまりに強いX線のため、分光結晶に当てると光が大きくなりすぎる、まっすぐ飛ばせないなど、光のコントロールが大変だったのです。私はその立ち上げ期、温度等条件を変えながら自動計測ができるシステムの開発

2層グラフェン間に存在する
様々な塩化アルミニウム (リン・松本・吾郷ら)

上：モデル図

右：高エネルギー分解能電子顕微鏡



高性能電子顕微鏡を用いた2.5次元物質の構造解析 (末永)

などに携っていました。そして光のコントロールが可能になり、計測も効率的に進められるようになるにつれて利用者がどんどん増え、今では年間1万人程が使う誰もが知る施設になっています。

2.5次元領域で活動していく中で、グラフェンやTMDCが活発に研究されていることは知っていましたが、X線の研究は思っていた以上にないことが分かりました。実は国内でも海外でも研究例がありません。私はこれまで様々な物質を扱ってきており、フラーレンやナノチューブが活発に出てきた当初はフラーレンを、その後は無機物の熱電変換材料や半導体などを扱ってきました。あまり研究例のないこの分野において、最先端のX線を使うことでできることがありそうだと様々な活動を通して感じているところです。

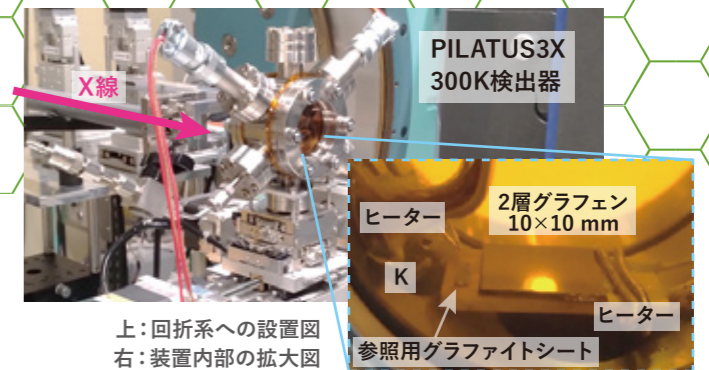
いただいた試料計測の難しさ、面白さについてお聞きしたいです。

末永 色々な方から試料をいただいて観測しますが、一番難しいのはやっぱりコンタミネーション、試料の汚染です。以前の電子顕微鏡では無視できた程度の小さな汚れでも、最近の感度の高い電子顕微鏡を使うとくっきりと見えてしまいます。それなのでカーボン原子数個程度のゴミであっても観察に影響してしまいます。これに関しては試料を作り送ってくださる方と、いつも長いことかけてディスカッションしています。

西堀 X線においてそこはすごくルーズです。放射光はちょっとしたゴミに関して比較的簡単に除ける術が確立しているため、あまり気にならないのです。自分自身が試料を作らないこともあり、専門の方が作る試料の安心感、それを計測する楽しさを感じる人が多いですね。

末永 そうですね。僕らは最初に最先端の試料のスペクトルを見ることが出来ます。試料を作った人よりも先に、世界中で誰も見たことがないスペクトルがビシッと出るのを、一番初めに見ることができる。それがまた自分で分かるんです。このスペクトルを見てるのは僕が世界で最初だなんて。そのときの興奮は多分やってみないと分からないと思うのですが、見た瞬間にこれはNatureに行くってのが分かるくらいで、本当に楽しいです。

西堀 本当に全く同じ気持ちです。我々の場合はデータを解析するプロセスが1つ入るので、その解析時にパズルが解けたような感覚になります。それまでの常識をガラッと変えるような構造が見つかったことが今までに何回もあり、それを見た瞬間はやっぱりすごいですよね。これ以上ないほど楽しいし、その瞬間を味わいたくてやっているとと言えるくらいです。

上：回折系への設置図
右：装置内部の拡大図グラフェンインタカレーションのために開発した
放射光その場観察装置 (西堀)

この領域ならではの活動を教えてください。

末永 西堀さんとも時々お話ししますが、吾郷さん(A01)・松本さん(A02)・リンさん(公募1期A04)と進めている2層グラフェンへのインターカレーションの共同研究が新しく、非常に面白いですね。グラファイトと同じ重ね方をしている2層グラフェンでは、グラファイトには入らないと思われていた物質や、予想されていなかった原子の並びで入ることがわかっていたりしています。これは2.5次元領域ならではのコラボレーションだと思います。

西堀 そうですね。この共同研究には私も参加していて、密にディスカッションしながら、様々な段階の試料を計測したり、特別な装置を作成したりしています。

末永 この共同研究では、西堀さんと僕は同じ試料を見ているのですが、視点の違う方向からそれぞれが見ているといえるでしょう。僕は小さなところを少しだけ見ていて、試料が大きくても一部だけしか見られないためローカルな情報が出ます。平均構造とか精度という面では全然劣るので、西堀さんのお仕事で精密に測定してもらい、全体像を見てもらうという感じです。

この領域は、色々な専門の先生方が集まり、皆さんの専門を出してうまくコラボレーションしていくメリットを、毎回行くたびに実感します。皆さん出し惜しみせずに本当に心を開いてディスカッションしていて、非常に風通しのよい共同研究ができているのかなと思っています。

用語説明

* SACLA: (Spring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) の略で、兵庫県の播磨科学公園都市にあるX線領域のレーザー光源。瞬間輝度ではSPring-8の1億倍のX線を利用できる。



末永 和知
大阪大学
産業科学研究所
教授



西堀 英治
筑波大学
数理物質系
教授

(活動班順 五十音順 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11月28日)