

理工学部物理学科／結晶物理学研究室  
物性物理学、無機固体化学

# 佐藤 博彦 教授

【プロフィール】佐藤 博彦(さとう ひろひこ)▷1988年、京大物理学部卒業。1993年、京大大学院理学研究科化学専攻博士後期課程修了。同年、岡崎共同研究機構分子科学研究所 IMS フェロー、1994年、東京工業大学理学部助手。2001年に中央大学理工学部助教、准教授を経て2008年より現職。2012年4月～2013年3月までデンマーク工科大学客員研究員。



## 新たな化合物をつくりだし、そこに これまでにない稀有な現象を発見する。さらに その先には、世界的な物理学の発展を目指す。

実験によって新しい化合物を合成し、そこで見られる新しい物理現象の発見を目指す。それが、佐藤先生の研究です。具体的には、高温高压の水中での化学反応を利用し、元素をさまざまに組み合わせた酸化物の結晶を合成します。それが、これまで世界に存在しなかった新たな物質につながる可能性があつて、実際に先生の研究室で学生がそうした発見に出会うことも年に何回かはあるそうです。ただ、その次に横たわるハードルが、新たな物質から興味深い現象が生まれるかどうか。もちろん可能性はさらに限られるのですが、試行錯誤を重ねて研究に向かう姿勢こそ価値があると、先生は語ります。大発見のチャンスを手にするために、その研究内容に近づいてみましょう。

### これまでにない物質をつくる それが最初のハードル

高温高压の水の中での化学反応を利用して、新たな物質をつくる。聞いただけで興味を引きつけられる研究テーマですが、その具体的な方法はどのように行われるのでしょうか。「細長い容器(写真)を電気炉に入れ、なかに入れた水を1500気圧で600℃まで熱し、その水のなかにカプセルに封入した原料を入れます。このなかには、数種類の遷移金属元素の粉末やその酸化物と、水や硫酸、水酸化ナトリウムなどの溶液が入っていて、ここで化学反応させます。実験では、圧力や温度、原料の種類と組み合わせ、その比率、さらに溶液の量・濃度などの条件を試行錯誤しながら変えて新たな物質を探索していきます。約1日加熱してからカプセルを開くのですが、ここで何らかの結晶が見つかったら、X線回折装置を使って構造を解析し、新しい物質かどうかを確認します。さらに、低温状態や磁場中での珍しい磁気特性や電気伝導性を測定し、最終的なゴールとなる新しい物理現象が見られるかどうかを探っていきます」

### 世界で初めての物質が生ま出す 新たな物理現象の発見へ

幸運にもカプセル内にできた結晶が、新たな化合物なのかどうかは、どのようにしたら分かるのでしょうか。次は佐藤先生にその点について話してもらいました。

「ドイツのカールスルーエにあるFIZという機関が製作した

『ICSD(Inorganic Crystal Structure Database)』という無機化合物の結晶構造データベースを参考に分析します。結晶中の原子間の距離を、X線回折装置で抽出した数値と比較するのですが、『単位格子(Unit Cell)』という箱のような単位で区切って、その一辺の長さや、頂点の角度で比較します。原子の並び方は、この単位格子で捉えると理解しやすいのです」

さらに、その先にある特異な現象について訊きました。

「たくさんの電子が互いに無関係に運動していると何も起きないのですが、電子同士が反発し合いながらたくさん集まっている『強相関電子系』という状態は異なります。この状態になると物質の性質がガラッと変化することがあるのです。そこでは例えば、化合物が一定温度以下になると磁石に変わったり、電気抵抗がゼロになる『超伝導』になるなど、面白い物理現象が見られます。したがって実験では、さまざまな条件の組み合わせによって、これまでにない電子の集まり、電子の振る舞いを実現できる化合物をいかに合成するかが目的となります」



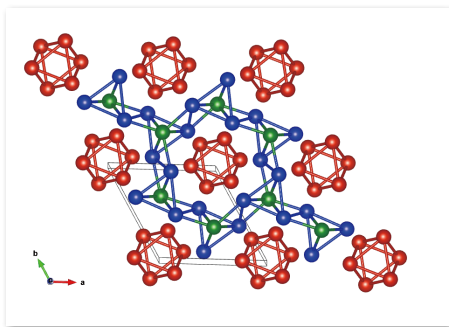
▲この容器内に原料として入れる「遷移金属元素」は、原子核の周囲を回る電子の軌道(s, p, dなど)のうち、特にd軌道に電子が不完全に入っている状態の元素。その場合、電子の移動による電気伝導や、電子の自転(スピン)による磁性などに由来する新たな現象が生まれる可能性が高まる。

## 手に入りたい物質を想像しつつも 最後は自然に任せる

自らつくり出した化合物に新たな物理現象を発見する。それはもちろん容易なことではありません。試行錯誤の過程に何があるのか。佐藤先生に訊きました。

「さまざまな遷移金属元素を組み合わせるとき、『原子がこんな並び方をした物質を作りたい』など、ある狙いをもって行うのですが、実際の化学反応を経た結果、どのような構造の結晶ができるかを予測することは簡単ではありません。コンピュータによるシミュレーションはスタートしたばかりで、まだ実験による結果を求める方が早い研究分野でもあります。したがって実験の結果から想像もつかない化合物を発見することは多いのです。ただ、容器のなかで見えない化合物について想像力を働かせ組み合わせを考えることは大切です。例えば、電子には上向きと下向きのスピンのあるのですが、隣同士のスピンは反対を向きたい、という物質を作ろうと計画します。スピンが四角形に並んでいる場合はそれが可能ですが、三角形の場合は絶対に不可能なので、どこかで無理をすることになります。このようになりたい状態になれずに無理をしている状態を物理学用語で『フラストレーション』と呼びます。このフラストレーションをもつ物質を作ると、隣同士のスピンが交互に逆を向くことができないため、これまでになかったスピンの並びや磁気的性質が得られる可能性があるのです。例えば、フラストレーションを解消するために、三角形が自発的に二等辺三角形にひずむ現象が現れる場合があります。あるいは、隣同士の原子がペアを作って、そこに上向きと下向きのスピンが入るものの、ペアの相手が次々変わる「スピン液体」状態になることも予想されます。実は、この不思議な状態が、一見関係ない「超伝導」の原因になりうる、という説も存在します。実験では、成功した場合にこのような面白い状況が生まれることを想像しながら行うことでモチベーションがアップします」

想像力を働かせながら、ミクロな世界の電子の動きをつかんでいく。その面白さは、十分に想像できます。



▲研究室の学生が実際に発見した、スピングラス特性を示す結晶の写真(上)と、X線構造解析による結晶の中の原子配列(下)。

## すぐに結果が予想できるテーマは 研究室では行わない

失敗のなかに成功を期待するような、佐藤先生の研究のなかで、果たして学生たちはどのような姿勢で学ぶのでしょうか。

「若い学生たちでも偶然の大発見に恵まれる可能性が非常に高いことは確かです。例えば、温度を下げても電子のスピンの向きが規則的に並ばず、無秩序のまま固まってしまう状態を、ガラス状態に例えて指す『スピングラス』と呼ぶのですが、新たなスピングラス物質を発見した学生が最近いました。

ただ、多くの場合は反応容器のなかに物質が生成されていたとしても、既に発見されている物質や取り立てて稀有な現象が見られないケースです。その場合に大切なのは、なぜそうなったかという失敗の原因を見極め『もう少しこの原料を増やしてみよう、減らしてみよう』と考えられるかどうかです。『とりあえず失敗だったから、また次をやろう』と、失敗を活かすことなく単に違う方法でやろう、と考えてはフィードバックが働きません。したがって小さな変更の積み重ねを根気強く行なうことが重要になります。もちろん、結果がある程度予想できてしまう実験を行えば失敗せず成功体験が味わえるのですが、このように安易に結果が出るような研究テーマは、私の研究室では選びません」

しかし、確かな予測ができないのは、先生も同じ。その先生にとっての目標はどこにあるのでしょうか。

「ライフワーク的な目標としては(電気抵抗が完全にゼロになる)『超伝導』現象を室温で発見することです。恐らくこれは全ての物性物理学者の夢であると思いますが、実現すれば電力を消費しない送電線や、超高速処理の“量子コンピュータ”を作ることができそうです。ミクロな世界を説明するために生まれた『量子力学』という学問があるのですが、室温での超伝導はこの量子力学の世界が日常世界に登場することになり、純粋に物理学の視点からも興味深いのです」

あくまで高いハードルを目指す先生の研究の先に、世界を驚かす大発見の可能性が横たわっています。



▲「強相関電子系」で見られる物理の普遍性と、さまざまな原料を組み合わせる化学の多様性の“いいとこ取り”の研究」と熱く語った佐藤先生。

### Message ~受験生に向けて~

「目的意識をしっかりとって勉強を」とよく言われますが、高校時代の興味は変わることもありますし、その必要はないと思います。むしろ目標を絞り込み過ぎず、偶然の出来事や出会いも大切にしながら、幅広い視野で進路を決めていってください。私の場合は、物理を学ぶという目的で大学に入りましたが、高校で嫌いだっただ化学が好きになりました。そんなことは予想できませんでしたし、大学で学ぶことは入学してみないとわかりません。