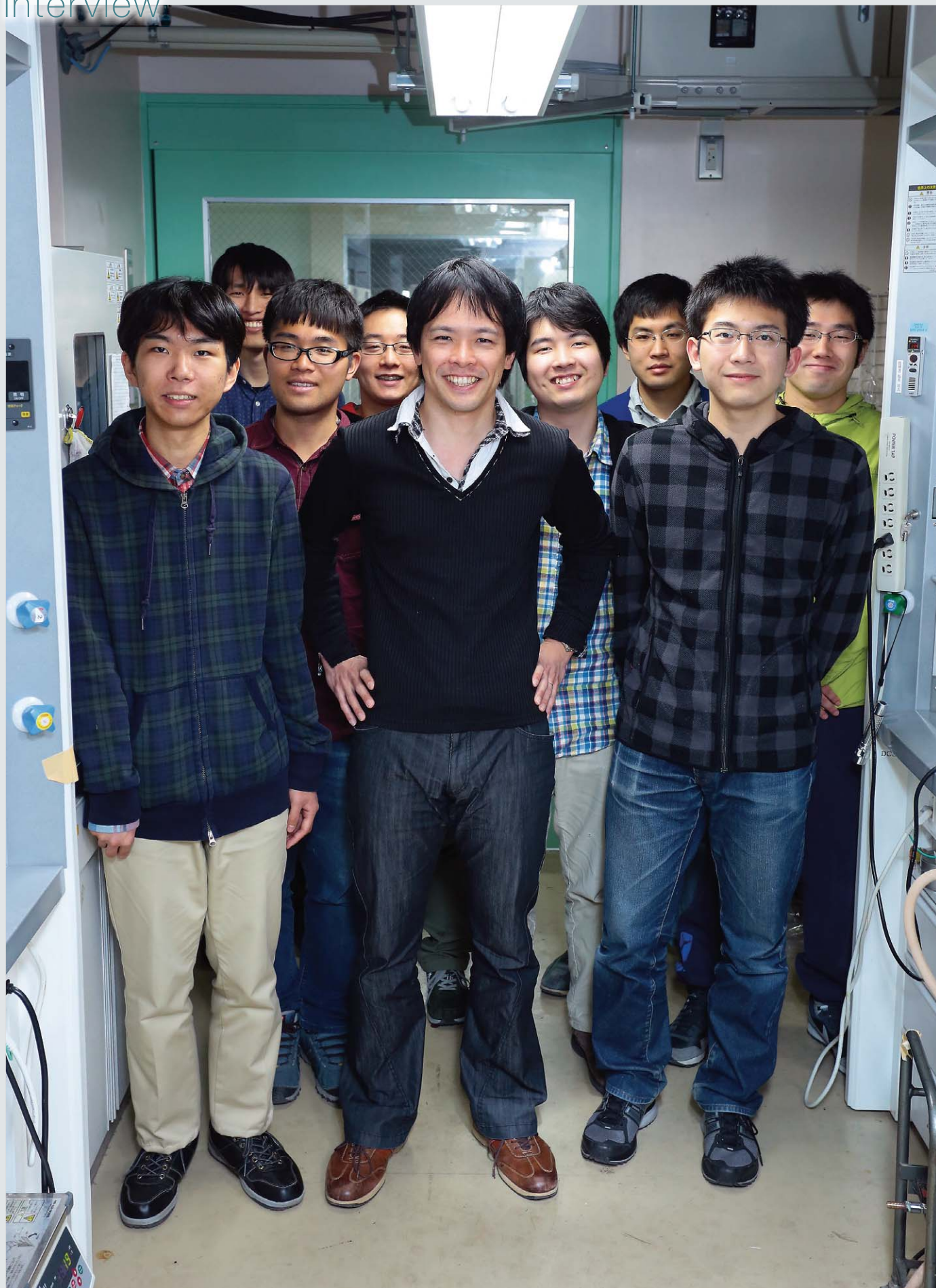




史上初の有機系二次元トポロジカル絶縁体の創成にチャレンジ

導電性を示すボトムアップ型ナノシートの創成に世界で初めて成功したのが2013年。

そこから予想外の展開が広がってきた。

そのナノシートが、史上初の有機系二次元トポロジカル絶縁体である可能性が高まってきたのだ。

それが実証されれば、世界中の物理・化学界に大きなインパクトを与えることも予想される。

東京大学
大学院理学系研究科化学専攻 助教

坂本良太

[さかもと・りょうた] 1980年、長野県出身。東京大学理学部化学科卒。同大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了。理学博士。東京理科大学理学部助教を経て、2010年1月から東京大学大学院理学系研究科化学専攻特任助教。同年10月から現職。赴任後の4年間に41報の論文と13報の総説を書き、5冊（共著を含む）の本を執筆し、17の招待講演を行ってきた。論文は最初から英語で書く。スポーツが大好きで筋トレとジョギングはほぼ毎日している。

「第32回松籟科学技術振興財団研究助成 受賞」

グラフェンのような結晶性層状化合物を、単層になるまで剥離してつくるトップダウン型のナノシートが世界的には主流です。でもこれは微細加工技術のような物理学的なアプローチですから、化学者としてはあまり面白くない（笑）。だから僕は有機分子や金属原子などの構成要素からナノシートをつくっていく方法をとっています。これをボトムアップ型のナノシートと呼んでいます。要は化学合成でつくるということです。化学者は分子を取り扱うのが得意ですからね。

こそボトムアップ型で機能性材料として使える物性などを示せば評価されるし、産業界にも興味を持ってもらえると思います。

世界で初めて導電性を確認

——ボトムアップ型のナノシートはすでにつくれているのですか。

はい、ジピリン金属錯体ナノシートなど、複数のボトムアップ型ナノシートの合成に成功しています。特にベンゼンヘキサチオールと金属塩の酢酸ニッケルを気液界面錯形成法でつくったジチオレンナノシートは、導電性が極めて高いことを実験で確認しています。導電性の測定には何層も重ねた厚いシートを用いましたが、本質的にナノシートに導電性があるのは間違いありません。ボトムアップ型で導電性を示したのはこれが世界で初めてです。まだ大きな面積のシートはつくれていませんが、高い導電性を持っていますから、エレクトロニクスの材料として使えるということです。

——これまでにいろいろな研究者が挑戦してもできなかったのに、先生が成功したのはどうしてなのでしょう。設計が優れていたという自負はあります。合成法も特徴的です。ベン

化学合成でつくるナノシート

——研究テーマのひとつにあげられているナノシートとは、どういうものなのでしょうか。

簡単に言うと、究極的な厚さが単原子層に達する二次元高分子のことです。厚さはナノメートルオーダーなのですが、横方向のサイズはその数百倍という異方性を持っています。電子材料として使うと、素子が劇的に小型化したり省電力化したりする可能性があることから、注目されている新規ナノ材料です。ただ、今はまさに基礎研究と応用研究の狭間の段階で、実用化はされていません。

——先生はどのようなナノシートを研究されているのですか。

——トップダウン型とボトムアップ型とでは特性に違いがあるのですか。

トップダウン型は特性も優れていて、研究者も多く、論文も数多く出されています。ただ、基本的には無機系の材料で、いろいろな制約があります。それに対してボトムアップ型は合成化学を駆使することで、有機物をも組み込むことが可能で、自由度が高いという特性があります。しかしボトムアップ型の研究はまだ8年くらいの歴史しかないので、研究者も論文の数も少なく、物性や応用展開について明らかにしたという報告はありません。基礎化学的には重要なテーマですが、何に使えるのか誰も示せていないのです。だから

ゼンヘキサチオールは有機物なので、油には溶けますが、水には溶けません。酢酸ニッケルは逆に水には溶けますが、油には溶けません。だからベンゼンヘキサチオールを油に溶かし、酢酸ニッケルを水に溶かすと混ぜずに二層分離します。そのとき界面で反応してできる膜がナノシートです。

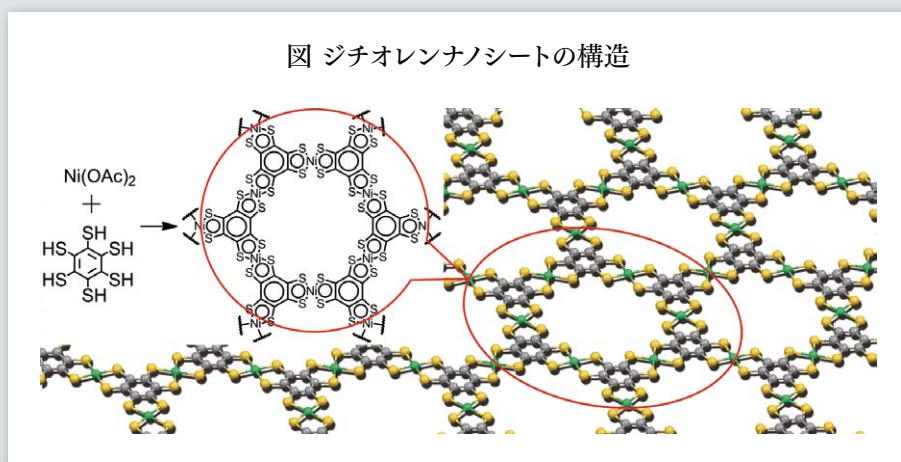
——世界で初めてというのはすごいですね。

2013年に論文を発表しました。日本ではあまり反応がなかったのですが、3カ月くらい経ったとき、米国のユタ大学のFeng Liu先生からメールが来ました。僕たちがつくったジチオレンナノシートはトポロジカル絶縁体の可能性がある。面白そうな研究だから頑張れという内容のメールでした。実はそのとき、トポロジカル絶縁体については何も知らなくて、「何、それ？」という感じでした（笑）。

スピントロニクスの可能性

——本当に何ですか、それは？

バルクは絶縁体なのに、エッジ部分はスピン偏極した金属性を示す物質のことで。エッジというのは、三次元系であれば面、二次元系であ



れば縁のことを指します。これは物理学の範疇なのであまり詳しくないのですが、電流ではなくスピンを超高速度で流す特性があるのです。電流だとどうしても抵抗があるので、ロスが発生します。そのために微細化や省エネ化などには限界があります。電子の電荷とスピンの両方を用いた新しいエレクトロニクスであるスピントロニクスは、そうした限界をはるかに凌駕する可能性があります。

——トポロジカル絶縁体はまだ実用化されていないのですか。

その存在が予測されたのが2005年のことです。今のところ無機系しか発見されていなくて、三次元のトポロジカル絶縁体は10種類以上実在例が報告されていますが、二次元系はわずか3例しかありません。で

すから僕たちのジチオレンナノシートが二次元トポロジカル絶縁体だとすれば、史上初の有機系のものとなるのです。

——トポロジカル絶縁体のデバイスができれば、効率化や省エネ化がもっと進むのですか。

そうですね。特に二次元トポロジカル絶縁体は三次元のものよりさらに優れていると言われています。

実証に必要な4課題

——その後、ユタ大学の先生とは会われましたか。

2014年の3月、Feng Liu先生に渡米してお会いしました。物理学会ではよく知られた先生で、僕たちはこの方にヒントとチャンスをもたらったわけです。それにしてもアメリカはすごいですね。日本にもトポロジカル絶縁体の研究をしている人はいるのですが、僕たちの論文に対する反応はありませんでした。アメリカの研究者はひとつの研究を徹底的に掘り下げますし、新しい境界領域にも積極的に飛び込んでいきます。そこは日本も学ばないといけないと思います。ジチオレンナノシートが、トポロジカル絶縁体であることが実証できれば面白いと、ワクワクしてきました。松籟財団に助成をお願いし



たのも、この実証をするためなのです。

——どうすれば実証できるのでしょうか。

酸化状態（フェルミレベル）の制御、角度分解光電子分光（ARPES）によるバンド構造の可視化、走査トンネル分光（STS）によるエッジ状態の観察、量子スピンホール伝導の観測などが必要になります。最初の2つについてはすでに少し着手しています。

——ますます難しくなってきました（苦笑）。ひとつずつ、簡単に説明していただけますか。まず酸化状態の制御とは？

電子が存在することのできる最大のエネルギーをフェルミレベルといいます。導電性などの物性は基本的に電子の状態で決まりますから、これを知るためにバンド計算という手法があります。

でも、バンド計算というのはあくまでも理論的な予測なので、やはり実測が必要です。それが2番目の、ARPESによるバンド構造の可視化です。これはかなり物理学寄りの測定技術が必要なので、物理の先生と共同研究で取り組んでいます。

実用化まで100年？

——STSによるエッジ状態の観察と、量子スピンホール伝導の観測はこれから手を付けるのですね。

STSに関しては3月の半ばから共同研究を始めました。でもまだどこまでいけるか分かりません。

——量子スピンホール伝導の観測とは？

トポロジカル絶縁体のエッジ部分は、ある特定の伝導率を示すことが理論的に提唱されていますので、こ

れを実測することに相当します。ただ、ARPESによる実測にしても量子スピンホール伝導の観測にしても、もっと大きくてきれいなボトムアップ型ナノシートをつくる必要があります。測定するには少なくとも数百ナノメートルくらいのサイズが必要なのですが、現状ではその1000分の1くらいのサイズしかできていません。まずそこをクリアしなければならないのですが、このハードルが結構高いのです。

——見通しはいかがですか。

正直、苦戦しています。今の合成法では小さなものはきれいにつくれますが、限界があるのかもしれない。この方法にとらわれず、合成方法を根本から見直す必要があるのかもしれないと考えています。

——大きくてきれいなものを安定的につくれるようになれば、この研究は大きく前進するのですね。

それは間違いありません。

——二次元トポロジカル絶縁体の実用

化されるとしたら、どれくらい先のことになるのでしょうか。

10年、20年ではないですね。もしかしたら100年くらいかかるかもしれません。今はまだ夢物語なのかなという気がします。

——当面は4つの課題をクリアするのが目標になりますが、それにはどれくらいかかりそうですか。

順調にいけば1～2年でできるはずです。

——研究は面白いですか。

もちろん。これは基礎化学全般に言えることですが、できることはある程度できるようになり、次は何を追究すればいいのかと考えている研究者が多いのではないのでしょうか。ナノシートは新しい領域でしかも手が届きそうですから面白いですね。最近、『ネイチャー』の姉妹誌にジピリンナノシートに関する論文が掲載されました。論文を書くのは好きですし、ストーリーを考え、読みやすくするのは得意です。これだけは負けない自信がありますよ。

図 ジピリンナノシートの構造

