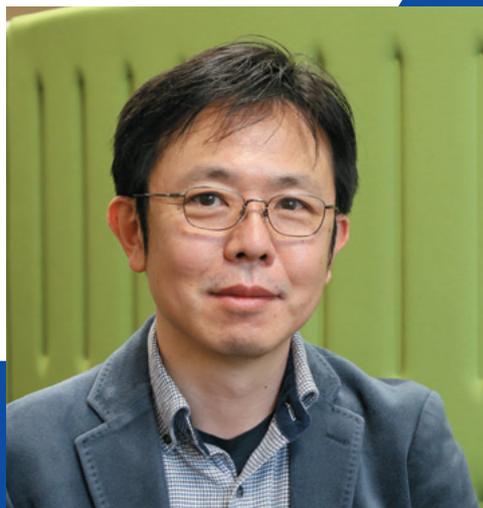


挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



村木 康二

NTT 物性科学基礎研究所
上席特別研究員

究極の目標は新しい動作 原理に基づく 量子コンピュータの実現。 自分を客観的に見つめ、 存在価値を確認する

NTT 物性科学基礎研究所量子固体物性研究グループは、電子が持つ波動性や重ね合わせ、スピンといった量子力学的性質に加え、電子間の相互作用によって生じる多体効果や相関効果に注目し、それらを半導体や原子層物質のヘテロ構造・ナノ構造を用いて生成・制御することで、ばらばらの電子では得られない新しい機能を持った量子デバイスや極限的な量子計測技術の開拓に臨んでいます。従来のデバイスでは使われていない電子の性質を利用することをめざして超低消費電力のデバイスや超高感度のセンサにつながるような物理現象を追究する村木康二 NTT 物性科学基礎研究所 上席特別研究員に研究の進捗と研究者としてのあり方について伺いました。



電子の潜在能力を引き出す量子相関 エレクトロニクス

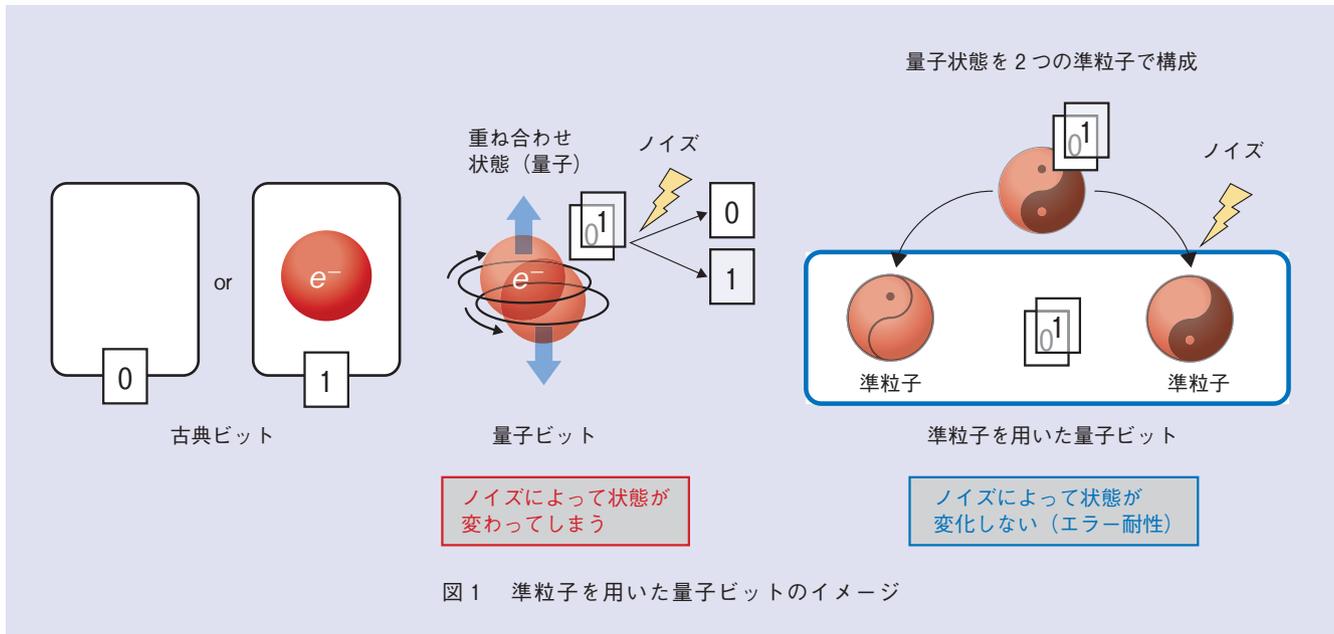
現在、手掛けている研究について教えてください。

異なる種類の半導体を人工的に積層した構造（ヘテロ構造）や微細加工した構造（ナノ構造）を用いて従来の半導体にはない物性や、それを用いた新しい機能を実現することをめざした研究をしています。

特に電子の量子力学的な性質、中でも「スピン」という、電子が持つ小さな磁石としての性質や、「多体効果」という多数の電子がそれぞれ勝手に動き回るのではなく集団と

して振る舞うことによって生じる効果に着目しています。

私たちは、従来のデバイスでは使われていない電子の性質を利用することをめざして、超低消費電力のデバイスや超高感度のセンサにつながるような物理現象を追究しているのですが、究極の目標はメディアで紹介されているような従来の量子コンピュータの、ノイズによって量子の状態が変化するという弱点を克服する（エラー耐性）、新しい動作原理に基づく量子コンピュータの実現です（図1）。こうした新しい物理現象の追究として、大きく分けて2つのアプローチで研究しています。1つは、先述の「多体効果」を用いたもので、もう1つは「トポロジカル絶縁体」

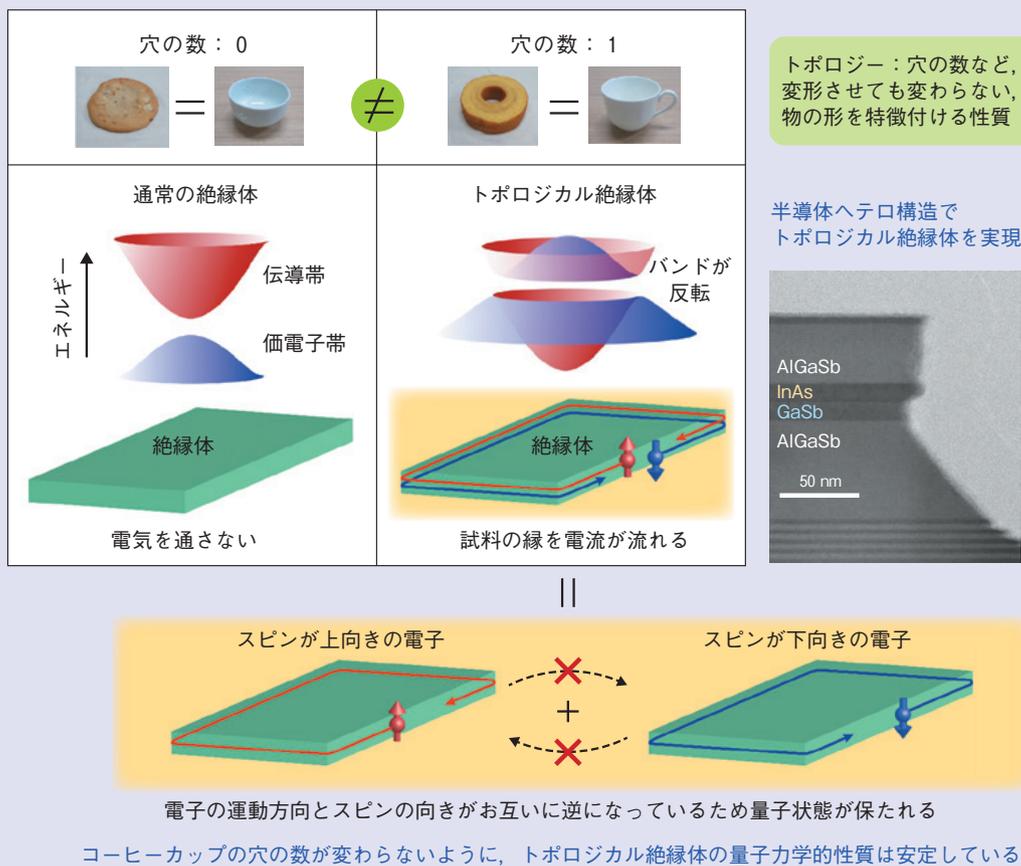


という新しい種類の物質を用いたもので、「スピン」と関係しています。

まず多体効果についてですが、その前に「準粒子」というものについて説明する必要があります。例としてはトランジスタの構成要素であるp型半導体で、マイナスの電荷を持つ電子が一杯に詰まっているところに電子がない状態（電子が抜けた孔のような状態なので「正孔」という）が1つあると、その正孔がプラスの電荷を持った粒子のように振る舞うというのですが、正孔の本質的な性質は電子と変わりません。私たちがめざしているのは、多体効果によって電子とは本質的に異なる性質を持った準粒子をつくることです。

もう1つのアプローチは「トポロジカル絶縁体」という物質を用いたものです。これは物理学の歴史の中でも非常に新しい概念で、最初に理論的に提案されたのが2005年です。トポロジカル絶縁体の基になる理論をつくった物理学者3人に2016年ノーベル物理学賞が授与されました。絶縁

体というのは電気を流さない物質のことです。2005年の理論によって、絶縁体にはトポロジカル絶縁体と通常の絶縁体の2種類があり、両者の境界には必ず電気を流す層が存在するということが分かったのです。私たちのグループでは半導体のヘテロ構造でこのトポロジカル絶縁体ができることを2013年に実験で示しました（図2）。トポロジカル絶縁体になるものとしてはさまざまな物質が報告されていますが、私たちが用いた半導体ヘテロ構造では、ゲート電極に電圧を加えることで、通常の絶縁体になったりトポロジカル絶縁体になったり、電氣的に制御できるのが特長です。実はこの系がトポロジカル絶縁体になることを実験で示したのは私たちが世界で2番目でした。最初のチームは界面に電流が流れていることを示すことで論文を発表しましたが、私たちはそれが絶縁体になっている、つまり界面以外には電流が流れていないことを示すために論文の完成に時間がかかりました。この論文は今でもよく引用されていますが、2番になったことで悔しい思いをし、成果をど



トポロジー：穴の数など、変形させても変わらない、物の形を特徴付ける性質

半導体ヘテロ構造でトポジカル絶縁体を実現

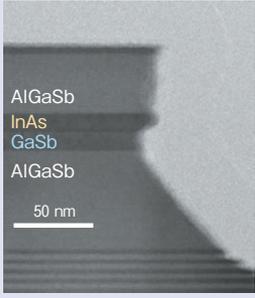


図2 半導体ヘテロ構造によるトポジカル絶縁体の実現

う見せていくか考えさせられました。

8年前にも取材させていただきましたが、この間にさまざまな成果を上げられたそうですね。

8年前の取材は、「多体効果」における「特殊な状況」にある電子のスピンの向きが同じ方向にそろっているということを核磁気共鳴という方法を使って示した実験の成果を、2012年に『Science』に発表した直後でした。スピンの向きによって電子が同じ位置に入ることができるかど

うかが決まるので、電子が理論が予測する「特殊な状態」にあることを示す重要な結果として高く評価されました。その後、2014年には同じ核磁気共鳴の方法を使って、別の条件では電子が結晶のように格子を組んで動かなくなること示し、論文を『Nature Physics』に発表することができました。これは電子の結晶化という長年考えられていた現象に対する新しい実験的証拠として評価されたことによるのですが、準粒子の性質を明らかにするという本来の目的からすると十分に満足できるものではありませんで



した。

それまでは背景にある電子の集団の性質を調べていたのですが、準粒子の性質を調べるには、より精密な測定技術が必要になってきました。そこで同じことに興味を持っていて、必要な技術と知識を持った当時大学にいた研究者に自分のグループに加わってもらいました。それまでは試料の作製から測定、理論解析までを一貫して行うのが自分の研究スタイルでしたが、それに拘ってはいけなかったからです。例えば準粒子が持つ電荷は電子が持つ電荷よりも小さいのですが、それを測定できる研究グループは世界でも限られています。最近発表した論文では、核磁気共鳴と準粒子の電荷測定を組み合わせることで、電流を流したときにどのように電子状態が変わっていくかを明らかにすることができました。これは自分ではなく、メンバーのアイデアによるものです。

トポロジカル絶縁体については、半導体のヘテロ構造でトポロジカル絶縁体になった次のステップとしては電気的な制御ですが、ここでも問題がありました。絶縁体になったのは非常に狭い条件で、さまざまな実験をするには不都合でした。そこで意図的に格子定数の異なる材料を取り入れることで結晶の歪みを利用して、2016年に絶縁体としての性質を改善することができ、2020年になって絶縁体としての性質を保ったままトポロジカル絶縁体と通常の絶縁体を電気的に切り替えることができるようになりました。それには結晶成長やゲート絶縁膜の改善など、地道な実験の積み重ねが必要でしたが、いずれも頑張ったのはグループの若い研究者たちです。

現在ではさまざまな物質がトポロジカル絶縁体であることが分かっていますが、界面チャンネルのスピンの性質については世界的にも期待どおりの結果がまだ得られていない状況で、本当のブレイクスルーがあるのはこれからだと考えています。



研究者に見習い期間はない

前回の取材から研究活動において変化したと感ずるのはどんなことでしょうか。

当時は、ポストドクター（ポスドク）といわれる、博士号取得後の任期付き研究員と2～3人の小さなチームで研究に勤んでいましたが、現在は、プロジェクトにかかわるメンバーも増えました。新型コロナウイルスの感染防止対策も意識して、若い研究者が実験に携われるようにシフトを調整したり、研究に没頭できるようにサポートする役割も増えました。チャレンジングな実験に直接かかわっているのはグループのメンバーなのです。

立場が変化したことで、自らが実験に携わる機会が少なくなった歯がゆさを感じることもあります。例えば、自分が直接実験しているのであれば、最初に結果を見るのは自分ですが、グループで研究しているときは若い研究者が実験を担いますから、彼らが先に実験結果を目にすることになります。私が研究結果を知るまでに、メンバーがその結果に対して何かを感じ、それを私に報告するというプロセスが加わりました。つまり、手にする結果は、ほかの研究者のフィルタを通したものということになります。ただ、この変化は悪いことではありません。自分では気付けないことにメンバーが気付いてくれることや、1人では成し得ない成果をグループなら上げることができるからです。自分では考えつかない提案や発案ももたらされることを考えると、歯がゆさよりも圧倒的にメンバーの貢献のほうが大きいのです。非常に恵まれた環境で仕事をしていると実感しています。

また、グループを束ねる立場として大切にしているのは、さまざまな興味や専門性を持つ研究者の特性を活かして、研究者個人としてもグループとしても良い方向へ向かうようにすることです。研究者は自分の興味のあることでなければ熱意を持っていないでしょうから、チームのメンバーそれ

それがやりたいことを活かすことは基本だと考えています。たとえ、本人のやりたいこと以外で成果を出せたとしても次に続きませんし、研究者自身がこれは自分で成し遂げた、自分だから出せた成果だと思えることでないと、手にした成果は真の成果とはいえないのではないのでしょうか。

さらに、成果を上げる人の多くは周囲との信頼関係を築くのが上手で、協働できる人だと思います。いろいろ考えてマネジメントしたからといって良い成果が生まれるとは限りませんが、現在、私たちは非常に良好な信頼関係の下、気兼ねなくアイデアを出し合っていますから、これからも良い成果を生み出していけるのではないかと思います。

新型コロナウイルス感染拡大防止の自粛期間に研究活動以外に変化はありましたか。

学生時代の趣味であった、エレキギター熱が再燃しました。長い間弾いていなかったのですが、緊急事態宣言で巣籠りをしている間に復活しました。本来、エレキギターはアンプから大きな音を出さないと演奏していて気持ち良くないのですが、デジタル技術のおかげでヘッドフォンから音を出すだけで、コンサートホールで大音量で演奏しているような感覚を味わうことができるのも1つの理由です。また、インターネットには好きなギタリストが奏法を解説するチャンネルや、アマチュアが自分の演奏を披露しているチャンネルがあります。興味を持ったことを通して世界や人とつながることができるという感覚は研究と相通じるものがあります。

ただ、研究には特殊な側面があります。音楽の場合、皆アマチュアから始まって、その中の一握りの人だけがプロになるわけですが、研究者は研究室のメンバーになった途端に一人前として扱われ、自分の研究を学会や論文で発表することになります。同じ文章を書く仕事でも、新聞記者だったら、記事をいくら書いてもボツにされて紙面に掲載されないということもあるのだろうと想像していますが、

研究者の場合、自分でボツにしない限り、最終的に論文という形で発表することが求められます。前回もお話したとおり、研究者には見習い期間もなければ、予行演習もないままにいきなりプロになってしまうのです。

加えて今回実感したのは、企業や大学といった所属する機関による研究者の活動背景の違いです。例えば、大学の研究者は研究費獲得のために費やす時間が、企業の研究者よりも多いでしょう。企業の研究者である私は、大学の研究者に比べ、研究費の獲得に費やす時間が少ないことも非常に恵まれていると実感しました。そうであるからこそ、企業の研究者である私は自らを律し、研究にもっと力を注がなければいけないと考えました。時にはこんなふうに分を客観的に見つめ、存在価値を確認することも大切ですね。



「あれがブレイクスルーだった」と言われるような仕事をしたい

存在価値を確認するというのは哲学的な響きがあります。村木さんは研究者の仕事はどうとらえていらっしゃいますか。

私は、研究者は研究を通じて自己実現をし、研究を通じて世界と、知らない人とつながる喜びを得ていると思います。研究を通して科学の地図をつくり、地図を通して世界や後世とつながるのです。確か前回も、基礎研究者の仕事は地図をつくることで、その行為は冒険であるとお話をしましたが、この考え方は今も変わりません。論文が間違っていない限りつくった地図は信用できるはずですが、作成を手掛けている地図（研究）が直接的に役立つことがなかったとしても、何かのかたちで役に立つことはあると思います。そして、この地図（研究）は後世に残せるものだと考えます。

ただ、冒険の仕方はあれからだいぶ変わりました。今は実際に実験をしているのは若い研究者で、自分はその結果



を見て質問したり助言したりする立場です。一緒に冒険をしているわけですが、実際に、自分の目で見たり手で触ったりすることが減っているのは明らかです。一方、若い研究者から教わることは楽しいですし、そういう機会が増えてきたのはたのしく思います。若い人と力を合わせて、「あれがブレイクスルーだった」と言われるような仕事をしたいですね。

後進に向けて一言アドバイスをお願いします。

学会等で若い研究者と話をしていると、現在の最先端の研究だけでなく、自分が生まれる前の研究のことまで驚くほど良く知っている人がいて圧倒されることがあります。自分が興味を持ったことを徹底的につきつめて研究することができるという、若い人の特権なのかなと思います。もちろん自分も興味を持ったことをつきつめて研究しているわけですが、1つのことにどれだけ時間とエネルギーを注ぎ込めるかという点、若い人には到底かないません。

一部の例外的な人を除いて、ほとんどの若い研究者は、やりたいことができなかつたり、なかなか成果が出なかつたり、自分の成果が認められていないように感じられたり、何となくもやもやした感覚が常にあると思います。しかし、それは若さの特権と常にセットになっているものなので、特権のほうを活かすことに集中してほしいです。あれこれ悩んでやりたいことをしない、というのはもったいないです。だからこそ、そこを切り拓いていくための選択肢や交渉力を培っていただきたいです。

それから最近、気付いたことがあります。自分よりも下の世代で、以前、研究所で実習生やポスドクをしていた人が、いろいろなキャリアを経て自分の研究グループを持つようになって大きな成果を出すということがいくつかありました。その人たちも研究者としてのキャリアは決して順風満帆ではなかったのですが、長い時間をかけて確固たるものを築いてきたことが実を結んだのだと思います。そう

いった人たちをみると、研究者人生は結構長いものだと思えて感じます。そして彼らに共通しているのはあきらめない姿勢です。

研究者として生きていくうえで、自分の興味のあることを掘り下げる深さとアンテナを高くして周囲を見る広さは重要です。研究テーマという入口志向に加えて、めざす成果という出口志向も併せ持ちたいです。多くの基礎研究者は入口志向かもしれませんが、入口という片側から掘り続けるだけではなく、さまざまな可能性を模索しながら出口からも掘ってみる。トンネルを両側から、さまざまなところを掘っていく発想は長期的にみると有効ではないでしょうか。可能性をさまざまに広げるためにも多種多様な人の意見に耳を傾けていきましょう。