



NIMS NOW

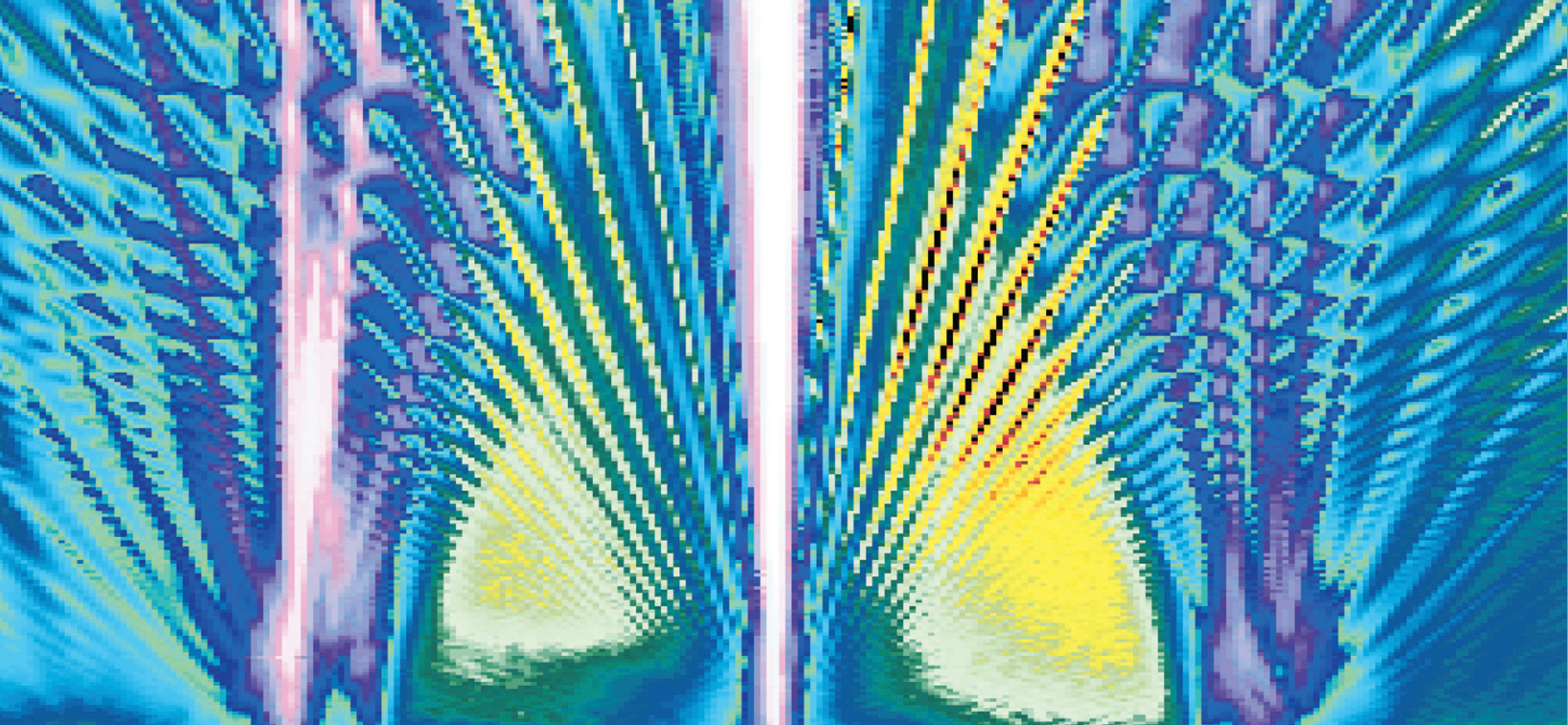
NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE

2025
No. 4

量子未来

もつれが未来を紡ぐ

—マテリアルで加速する量子研究—



「二層グラフェン/hBNモアレ量子ドット素子」の電子が描く、量子の“蝶”（P.9参照）。

量子マテリアル研究は どこまできて、どこへ向かうか

量子力学が誕生してから、100 年が経った^{*1}。
そのような記念すべき年に、今日の「量子コンピュータ」につながる基礎技術を発見した 3 名の研究者^{*2} へノーベル物理学賞が贈られることが決定した。
量子力学にもとづく物質のふるまい（量子現象）は、
ほかにも「量子センサ」や「量子暗号通信」といった革新的な技術の構想をもたらし、
実現に向けた熾烈な研究開発競争が世界中で繰り広げられている。

「量子マテリアル」は、量子現象を自在に操るための舞台である。
制御すべきは、電子や光子わずか1個が織りなす極限の事象だ。
問題は、それをどうやって制御するか――。

量子マテリアルの研究開発では、
結晶中のごくわずかな不純物や欠陥、素子の加工精度など、
従来の技術では問題にならないような些細な要素も考慮しなければならない。
さらに、最先端の観測技術によって新奇の量子物性が解き明かされつつあり、
量子の世界は拡張しつづけている。

量子マテリアル研究はどこまできて、どこへ向かうのか。
NIMS の研究事例から、その軌跡と未来像を描き出す。

^{*1} 1925年、ドイツの物理学者ヴェルナー・ハイゼンベルクによる「行列力学」の発表から100年。
^{*2} 「電気回路におけるマクロなトンネル効果とエネルギー量子化の発見」により、
2025年のノーベル物理学賞がジョン・クラーク氏、ミッシェル・デボレ氏、ジョン・マルティニス氏に贈られる。

Webでも読めます



<https://nimsnow.nims.go.jp/>

寺地 徳之

Tokuyuki Teraji

電子・光機能材料研究センター
半導体欠陥制御グループ
グループリーダー

専門は、薄膜成長と半導体物性。特にマイクロ波プラズマ化学気相成長（MPCVD）法による超高純度ダイヤモンドの結晶作製に力を入れている（Vol.21 No.4 P.10に研究紹介）。最近は量子センサや量子通信に関する研究にも注力している。



小塚 裕介

Yusuke Kozuka

ナノアーキテクトニクス材料研究センター（MANA）
量子材料分野 量子ビット材料グループ
グループリーダー

専門は、薄膜材料の作製と微細加工および表面・界面の物性研究。近年、量子コンピュータで情報を担う量子ビットの材料候補として、世界で初めて酸化亜鉛の量子ドット形成に成功（P.7～研究紹介）。

量子に挑み、量子を愉しむ

特別座談会



内橋 隆

Takashi Uchihashi

ナノアーキテクトニクス材料研究センター（MANA）
副センター長／
量子材料分野 分野長

専門は、極低温下における半導体表面・界面の物性研究（P.11に研究紹介）。最近は、主に超伝導現象にフォーカス。2025年からMANA副センター長、量子材料分野の分野長。



NIMS は「量子マテリアル」の研究開発を重点テーマに位置づけ、
2020 年から約 5 年間にわたりプロジェクトを推進してきた。
研究者たちが“究極”と語る量子研究のシビアさ、そして、面白さとは――。
プロジェクトを推進してきた3名の研究者に、その醍醐味と課題を聞いた。

 マーカーの用語は P.6 に解説つき



「量子物性」と「量子技術」の両面で 量子マテリアルをドライブ

内橋：物性の説明にはほとんどの場合、量子力学が必要ですから、広義にはあらゆるものが「量子マテリアル」と言えますが、私は特に、20世紀末から21世紀にかけて発見された新たな量子現象を利用した材料が「量子マテリアル」であると認識しています。中でも象徴的なのが、2005年ごろにその特性が明らかになった、原子層物質のグラフェンです。グラフェンにおける電子の独特なふるまいが明らかになって以降、たとえば2枚のグラフェンのモアレ構造が**超伝導現象**を示すなど、新しい量子現象が次々と発見されています。最初の報告から約20年経ちましたが、グラフェン研究の勢いは落ち着くどころか、むしろ加速していますよね。

小塚：グラフェンは、量子マテリアル研究の幅を一気に広げましたよね。それ以前は、良質な試料をつくれる研究室が世界に数カ所しかなく、試料が入手できてはじめて研究に着手できる、という状況でした。一方、グラフェンのような原子層物質は、基本的なつくり方さえ学べば比較的誰でも扱えます。これは大きな変化です。

内橋：「ナノスケールの物理が民主化した」と言っている人もいました。私は量子分野の研究者のスタンスは、大きく2つに分けられると考えています。新奇な物理を追究する「量子物性」と、その積極利用を目指す「量子技術」です。寺地さんは量子技術、私は量子物性、そして、小塚さんはその両方に関わっているという認識です。

寺地：私も同様の認識です。私はダイヤモンド結晶に含まれる、窒素（N）と空孔（Vacancy）が隣接した「NVセンタ」という点欠陥を利用して、「**量子通信**」や「**量子センサ**」への応用研究を進めています。もともとは半導体デバイス応用を見据えてダイヤモンドの合成を進めていましたが、約15年前に、ダイヤモンドが量子デバイスに応用できる可能性を知り、「これは高純度なダイヤモンドの合成技術をもつNIMSが取り組むべき課題だ」と思い、この分野に飛び込みました。多くの量子現象は、極低温でなければ安定しないのに対し、ダイヤモンドは強固な結晶構造に守られるために室温でも量子状態を保持できるユニークな材料であり、これは挑戦する価値があると感じたのです。

小塚：量子技術における一般的な研究プロセスは、まず極低温下で量子現象の観測と基礎実験を行い、その後、動作温度をどこまで上げられるか追究していく、というものです。私自身は**量子コンピュータ**の情報を

担う**量子ビット**の候補として、「半導体量子ドット」を研究していますが、これは極低温でのみ動作します。それに対し、ダイヤモンドは材料の設計次第で高温環境でも動作する量子デバイスが実現できる可能性を示唆しており、とても興味深い事例です。

内橋：一方、量子コンピュータについては「極低温であっても運用する価値がある」というのが共通認識ですよね。現時点では極低温下でしか発現しない量子物性があり、いわば未来技術の宝庫です。たとえば「**マヨラナ粒子**」は極低温下、ある種の超伝導体で発現すると理論的に予測されている準粒子です。不思議なもので、粒子の位置を“一周ぐるっと回す”と普通の状態に戻るはずが、まったく違う状態になったりする。しかし、直接的に観測された例はなく“幻の粒子”とも呼ばれてきました。それが最近、マイクロソフトの研究チームが「マヨラナ粒子を用いた量子ビット生成に成功した」と発表し、再び注目を浴びています。私も超伝導を研究していますから、その動向には注目しています。

小塚：今回の発表は、マヨラナ粒子の存在の是非も含めて大きな話題となっていますよね。とはいえ、今でこそ量子コンピュータが注目されていますが、約25年前に最初の量子ビット候補が出てきたときには量子状態を保持できる時間（**コヒーレンス時間**）が1ナノ秒にも満たなかったので、本当に使いものになるとは誰も信じていませんでした。でも「原理的にはできる」という信念を持ち、諦めずに研究を続けてきた人たちが改

善を重ね、今につながっていると思います。どのアプローチが最終的に結実するかを見通すのは困難です。だからこそ、基礎的な量子物性研究も意義深く、それも含めてコミュニティ全体が成熟していくことがきわめて重要だと思っています。

究極的にシビアな量子マテリアル研究 ——その難しさ、面白さ

小塚：量子ドットにしるダイヤモンドにしる、量子技術の最大の課題は「コヒーレンス時間をいかに延ばすか」という点です。コヒーレンス時間が長いほど信号を正確に読み出せますが、量子状態は結晶中のわずかな不純物や欠陥、熱ゆらぎ、周囲の電子スピンとの相互作用など、さまざまな外的要因で壊れてしまいます。コヒーレンス時間を延ばすために、私たち材料研究者は、結晶の品質を高め、それを精度よく加工する技術の開発に注力していますが、これはきわめて高度な課題です。

寺地：量子デバイスに要求される精度は、従来の半導体デバイスとは比べものになりませんからね。たとえば、ダイヤモンドを量子通信に使う場合には、異なる単一NVセンタにレーザ光を当て、そこから出てくる別々の単一光子をもつれさせる、という操作を行います。このとき、もつれ操作に用いる単一NVセンタ間の発光周波数の差は、100メガヘルツ以下のズレに抑える必要がある。これは波長ズレに換算すると、0.01ナノメートル以下の精度です。しかも、それを2～3時間維持する必要があります。従来の光学デバイスなら、0.1ナノメートルくらいの波長ズレは許容範囲といえますが、量子デバイスでは「まったく使いものにならない」と評価されてしまう厳しさがあります。

内橋：まさに究極ですね。デバイス化するうえでは、微細加工の段階でも苦勞されているのではないですか。

寺地：本当にそのとおりで、せっかくいい結晶ができて、NVセンタからの光を結晶外へ取り出すレンズ構造を加工する段階でダメージが発生し、一気に特性が下がってしまうこともあります。それを防ぐために、専



用の加工プロセス開発が必要なこともあります。また、結晶の作製プロセスでも「“普通”の感覚が通用しないのが量子マテリアルだ」と痛感した出来事がありました。私の研究室のポストドクが量子通信用ダイヤモンドをCVD法で成長し、優れた特性を示すダイヤモンドができました。ところが、私がそのつくり方を聞いていざ再現しようとしても、どうもうまいかない。もっと詳しく手順を聞いてみたところ、ロードロックチャンバー（真空予備室）がついた真空装置にもかかわらず「真空排気に全体で丸1日以上かけた」と言うのです。私の長年の経験からすれば「そこまで長時間の真空排気は必要ない」と感じてしまうような作業です。ところが、実際にその手順で結晶成長をしたところ、狙い通りの特性が出た。現状では、何が結晶の特性に利くのかを見極めるのは難しいのです。これほど要求の高い材料制御はなかなかありませんが、NVセンタの理論的なポテンシャルに挑戦することが、この研究の醍醐味でもあります。

小塚：量子マテリアル研究では、材料を評価する側の役割も非常に大きいですね。材料作製と同様に、その特性を測定するのにも、量子力学の深い理解と高い技術力が求められます。むしろ、量子マテリアル研究では、評価者が「材料をこう変えたい」と研究を主導することが多いのです。NIMSでは作製と測定の専門家がすぐそばにいま

すから、そうしたやりとりが効率よく進められます。また、各大学・研究機関にはそれぞれ異なる得意分野や技術があって、いろいろな専門家と連携することで新しい発見やニーズが見えてきますから、積極的に連携していくべきだと考えています。

内橋：その重要性は私も実感しました。5年近くにわたってNIMSが行ってきたプロジェクトでは、材料評価や理論、計算科学など、NIMS内でも普段はほとんど交流のない分野の研究者がチームを組むことになりました。私は普段、半導体の表面で起こる極低温下での超伝導現象を、走査型トンネル顕微鏡（STM）などを用いて観察していますが、プロジェクトでは材料作製の研究者とタッグを組み、シリコン表面上に新たなモアレ構造を作ることに成功しました。私たちが作製したモアレ構造は、アンチモンなど原子番号の大きな“重い元素”からなる原子層物質で形成したものです。重い元素を選ぶとスピン軌道相互作用が強くなるため、たとえば先ほど話したマヨラナ粒子が関与する超伝導など、新たな物性の発見につながればと、さらに追究しているところです。こうした発展は、異分野の研究者と連携してこそのもので、量子マテリアル研究は時間のかかるものですが、プロジェクトで築いた連携を継続していくことで、今後もNIMSからさまざまな成果が生まれていくと期待しています。

材料の研究者を量子研究に引き込む

寺地：材料研究者の中には、「量子技術の研究には踏み込みづらい」と考えている人が少なくありません。その理由の一つに、既存の製造装置や評価装置では対応できないという点があります。現に「量子技術の扱い方を企業の方にレクチャーする」といったテーマが国の推進するプロジェクトの一課題になるくらい、量子技術は一般企業や量子分野以外の研究者にとってはハードルが高いのです。

小塚：評価の方法自体が、従来のものとは根本的に違いますからね。典型的な電子デバイスの評価方法は、電圧や電流の計測が多く、子どものころから理科の授業で慣れ親しんできた電気回路の実験と地続きです。しかし、量子の分野は、たとえば「マイクロ波を照射して周波数を測る」といった特殊な操作が必要なので、熟練した研究者ほど参入に障壁を感じるようです。また、半導体分野はすでに学問体系が確立されているので、必ずしもコンピュータの計算アルゴリズムや量子力学を熟知していなくても、ある程度の基準値を参考にして材料研究が進められます。それに対し、量子分野はまだ確立されておらず、自分で量子力学を理解して材料の仕様を定義しなくてはならない段階です。今後、半導体のように専門が分化し、自分が活躍できる領域を見つけ

やすくなれば参入者も増えて、新しい技術がさらに生まれやすくなると思います。そのためにも、いま量子に関わっている人たちが積極的に量子技術の教育に携わり、理解をちょっとずつ変えていく、そうした活動も今後ますます必要になると感じています。将来、中学や高校の理科の授業で、量子に関する実験などが組み込まれるようになれば、量子に対する心理的なハードルが下がり、徐々に「量子ネイティブ」が増えていくのかもしれない。

寺地：すでに若手研究者の中には、材料の作製から評価まで、すべて自力でできる人が増えてきているのを感じます。かつて私がそうであったように、量子研究を「自分には関係のない分野」と思っている材料研究



者に、「自分にも関係があるかも知れない」と気づいてもらえるように、まずはコミュニティを広げていきたいですね。

内橋：そのためにも、やはりNIMSの量子研究を発展させていくことが重要だと再認識しました。また、今回の座談会によって、改めて量子技術の難易度の高さが分かりました。だからこそ、一緒に協力することの大切さも強く感じました。量子の世界にはとても奥深い物理があって、それに触れられることが醍醐味です。それを追究していくことによって、一段高いレベルの新しい物理の体系や、世界を変える技術が生まれると信じています。
(文・山田久美)

Research Highlights >>

群雄割拠の量子コンピュータ研究

量子ビット材料の研究開発最前線

現在、量子コンピュータの実現に向け、「超伝導方式」や「半導体方式」、「イオントラップ方式」、「光量子方式」など複数の原理が提案され、世界中の研究者が原理実証にしのぎを削っている。なかでも、情報の担い手である「量子ビット」の集積能力が高く小型化に有利なのが、半導体方式だ。これは、半導体の結晶中に「量子ドット」と呼ばれる直径数十nm程度の構造をつくり、電子を1～2個だけ閉じ込める。その量子状態の制御により計算を行う仕組みだ。

半導体方式のなかでも、材料の候補は複数ある。その代表格は「ガリウムヒ素 (GaAs)」と「シリコン (Si)」である。いずれも高品質な結晶作製技術が確立されており、従来の半導体製造プロセスにおいて微細加工技術の知見が蓄積されている。また近年、2次元物質を重ね合わせた「モアレ超格子」がさまざまな物性を発現することが明らかになり、量子ビットへの応用研究が熱を帯びている。さらには「酸化亜鉛」という新たな選択肢が生まれるなど、まさに群雄割拠の状況だ。

いかなる量子デバイスにおいても、その性能の指標となるのが、電子が量子状態を保持できる時間（コヒーレンス時間）である。結晶中に含まれる不純物や欠陥、原子核の自転のような運動により生じる「核スピン」、原子核と電子との間で生じる「スピン軌道相互作用」が、コヒーレンス時間の低下を招く。また、電子が入る伝導帯が複数あるケースでは、電子が伝導帯にランダムに入ることにより量子状態を安定して保つことが難しくなる。量子ビットを開発するうえでは、こうしたさまざまな要因を考慮した材料選択が重要だ。ここからは、その課題に取り組む量子ビット材料グループの研究を紹介する。

Case #1



小塚 裕介

Yusuke Kozuka

ナノアーキテクトニクス材料研究センター
(MANA)
量子材料分野 量子ビット材料グループ
グループリーダー

Case #2



岩崎 拓哉

Takuya Iwasaki

ナノアーキテクトニクス材料研究センター
(MANA)
量子材料分野 量子ビット材料グループ
主任研究員

用語解説

重ね合わせ

量子力学の法則にしたがう粒子（電子や光子など）が、スピンの向きや運動量、位置、エネルギーなどに関して、複数の状態を同時に持つ現象。重ね合わせ状態にある粒子は、観測されるまで特定の状態に確定せず、観測によって一つの状態に収束する。

もつれ

量子状態にある粒子が、互いに強い相関をもった状態のこと。もつれた粒子では、一方の粒子の状態を観測すると、たとえ遠く離れていても、もう一方の粒子の状態が相関的に決まる。古典物理学では説明できないこの性質が、量子計算の高速化や量子通信の秘匿性のカギとなっている。たとえば量子コンピュータでは、量子ビット同士をもつれさせることにより、一つの量子ビットを操作するだけで全体の情報を同時に変化。大規模な並列計算を高速に処理することが可能になる。

コヒーレンス時間

決まった量子状態を保持できる時間。

量子ビット

“0・1”の情報を任意の割り合いで「**重ね合わせ**」られる、量子コンピュータにおける情報の基本単位。

超伝導現象

物質の電気抵抗がゼロになる現象。クーバー対と呼ばれる量子力学的にもつれた電子のペアが、散乱などの要因によってエネルギーを失うことなく協調して働くため、抵抗なく電流が流れる。

マヨラナ粒子

粒子と反粒子（たとえば電子に対して陽電子はその反粒子）が同一の性質をもつ、仮想的な素粒子。一般的に、粒子と反粒子は性質が異なるため（たとえば電子は負の電荷をもち、陽電子は正の電荷をもつ）、マヨラナ粒子ではない。一方、ある種の超伝導物質中では、電子と正孔（電子の抜けた孔）が同じ割合で「重ね合わせ」られた粒子（準粒子）が形成されることがある。この場合、その粒子と反粒子は完全に一致するため、マヨラナ粒子が実現していると理論上考えられている。

量子コンピュータ

量子の特徴である、膨大な情報が任意の割合で混ざった「重ね合わせ」の情報を利用して計算するコンピュータ。所定の操作を行っていくと重ね合わせの情報が変化し、膨大な情報から必要な情報へと終着する。特定の計算については劇的な計算速度改善が得られる。

量子通信

離れた情報が相関し合う「**もつれ**」や、情報がコピーできない「複製不可能性」という量子特有の性質を利用した秘匿性の高い情報通信手法。

量子センサ

量子状態が外場（磁場や温度、圧力など）によって容易に変化する特性を利用して、外場を高感度に測定するセンシング手法。



世界初！「酸化亜鉛量子ドット」による 単一電子制御に成功

小塚 裕介
Yusuke Kozuka

世界屈指の酸化亜鉛の成膜技術

材料候補が林立している、半導体量子ビット。なかでも、量子ビット材料グループを率いる小塚が着目しているのが「酸化亜鉛（ZnO）」だ。ZnOが量子ビットとして有望な理由について、小塚は「ZnOはスピン軌道相互作用と超微細相互作用がともに弱く、伝導帯が一つしかないため情報損失リスクが低いこと」と説明する。

しかし、これまでZnO量子ドットに電子を閉じ込めることに成功した例は存在しなかった。なぜなら、高品質なZnO薄膜を作製するのが難しかったからだ。そうしたなか、2024年11月、小塚は東北大学など3機関と共同で、ZnO量子ドットに単一電子を閉じ込める操作に世界で初めて成功し、国内外から注目を浴びている。その成功要因はどこにあるのだろうか。

材料が量子ビットとして機能することを実証するためには、材料作製からデバイス加工、特性評価、検証まで、多段階のプロセスを要する。今回、ZnO 量子ドットを作製するうえで小塚が主に担当したのは、材料作製とデバイス加工だ。

「私はかつて在籍していた東京大学で川崎雅司教授のもと、『分子線エピタキシー（MBE）法』*で高純度なZnOの薄膜結晶をつくるノウハウを蓄積してきました。それを突き詰めたことにより、ZnOの品質は他機関ではまねできないレベルにまで達しています。ZnOを量子マテリアルとするためには薄膜結晶から電子の散乱源となる不純物や欠陥を取り除く必要がありますが、それらの発生要因を特定するのは容易ではありませんでした。そこで、要因に当たりをつけながら作製手順の見直しやMBE装置の改良を進め、作製したZnO薄膜の特性を計測により評価する作業を何度も繰り返

しました。たとえば、原料をより高純度なZnや酸素に変更したり、MBE装置のチャンバー部材を簡素化したりすることにより、徐々に結晶の品質を向上させていきました」（小塚）

ZnOへのダメージを最小限に抑える 2段階エッチング法を開発

加えて、小塚はポイントをこう説明する。「『量子マテリアル』という材料に注目が集まりやすいのですが、実際にデバイス化して量子状態を制御するためには精密な微細加工技術が不可欠です。量子ドットの場合、ZnO薄膜を削る（エッチング）、絶縁膜を積層するなどして、特殊な設計の素子を作製します（図）。ZnOは量子ドット開発の前例がなかったため、工程ごとに条件を洗い出し、最適化していく必要がありました。特に、ZnOへのダメージを最小限に抑えるエッチング手法の確立に1年以上の時間を費やしました。ZnO量子ドット中の電子を操作するためには、エッチングで電子と金属電極が接触できる構造をつくる必要があります。しかし、ダメージを抑えようとすると金属電極との良い接触が取れなくなり、逆に良い接触を得ようとするとZnO全体にダメージが入ってしまう、という問題が起きました。最終的に、一次エッチングでは表面にある程度ダメージを与える手法を用い、二次エッチングでそのダメージ層を取り除く、という2段階の手法を開発することにより、結晶の品質を保ちつつ金属電極との良好な接触を実現することができました」（小塚）

量子ドットにおける単一電子操作でも、複数の電極それぞれにかける電圧条件を一つずつ試す必要があり、条件は非常に複雑だった。その検証は東北大学の大家

朋廣准教授（併・NIMS 主幹招聘研究員）が率いる研究チームが担当。材料開発からデバイスの作製、評価・検証まで、約3年を要したこの成果について、小塚は「連携あつての成果」と強調する。緊密な連携で目指す次の課題は、ZnO 量子ドット中の電子スピンの量子状態を制御することだ。ZnO 量子ドットという新たな材料候補を手にも、量子マテリアル研究にはずみをつける。

*分子線エピタキシー法…超高真空中で原料を加熱し、分子線として基板に飛ばすことにより、基板上に薄膜を成長させていく手法。

（文・山田久美）

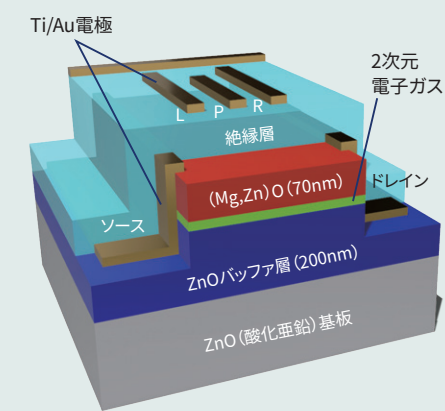
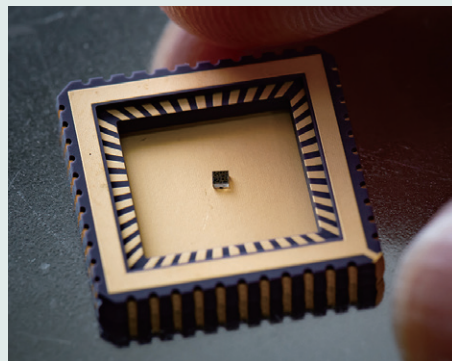


図 ZnO量子ドットの構造図。配置した3つの電極「L（左）」「P（ランジャー）」「R（右）」のうち、LとRの電極から電圧をかけることによってバリアをつくり、電子を1〜2個閉じ込める（静電的閉じ込め型）。Pの電極でその電子の状態を制御する。小塚はこのセットを複数個並べた量子ドットを作製した。動作温度環境は50ミリケルビン（−273.10℃）。



ケース（チップキャリア）中央にある1mm角のものが、小塚が作製したZnO量子ドット。

Case #2

2次元物質「グラフェン」で拓く 量子デバイスの可能性

岩崎 拓哉
Takuya Iwasaki

「スピン」と「バレー」の同時制御に挑む

量子マテリアル研究を20年近くけん引してきた材料がある。2次元物質の「グラフェン」だ。グラフェンとは、炭素原子からなる六角形が平面上に並んだ2次元物質である。炭素原子の大部分を占める¹²Cは、コヒーレンス時間の低下を招く核スピンをもたないため、超微細相互作用が生じない。また、グラフェンはSiをはるかにしのぐ電子移動度を示すなど、量子ビットとして有望な性質を備えている。

しかし、GaAsやSiなら数ビットの量子操作は実現しているが、グラフェンではまだ実現できていない。その理由は、素子作製に高い技術力が要求されるからだ。グラフェンは元来、電子が動く際の障壁となるバンドギャップがゼロであるため、電子をピンポイントに閉じ込めるのが難しい物質だ。世界トップレベルの研究グループでも、単一電子の制御を実現するために、素子設計や微細加工法の最適解を手探りで探索しているような状況だ。

それだけ素子化が困難でありながら、グラフェンが研究者を魅了する理由について、実際にその研究に取り組んでいる岩崎

は「グラフェンは『バレー』と『スピン』という2つの量子状態を利用できるのです」と語る。電子の量子状態といえば、スピンが代表的だ（図1左）。上向き・下向きをそれぞれ“0・1”と対応させる仕組みは、他の量子ビット材料でも共通している。

では、バレーとはいったい何なのだろうか。概念的な話になるが、原子が規則正しく並んだ結晶中では、電子は波のようにふるまい、結晶の周期性の影響を受けて、電子が取り得るエネルギー範囲（バンド構造）が形成される。グラフェンの場合、そのバンド構造は2つの円錐が頂点でつながったような特徴的な形状となる（図1右）。このとき、円錐の頂点における電子の状態は、エネルギーは同じだが、波数ベクトル（電子

の運動方向と運動量）が異なる「Kバレー」「K'バレー」という2つの状態を取り得る。つまり、量子ドットに閉じ込めた電子のバレー状態を区別できれば、これにスピンの上向き・下向きの状態制御も組み合わせることにより、計4パターンの情報を表現できる可能性がある。この自由度の高さこそ、グラフェンの魅力というわけだ。

グラフェンとh-BNを重ね合わせた 世界最高水準の 量子ドット素子の作製に成功

バレーの量子状態はどのように制御するのだろうか。「実は、一つ一つのバレーを操作する方法

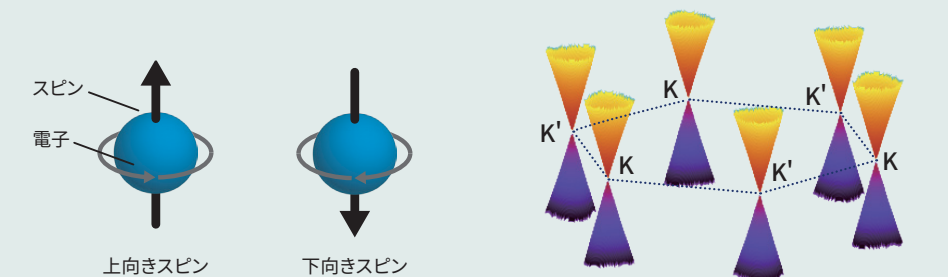


図1 電子がもつ2つの自由度、「スピン」と「バレー」のイメージ。スピンは電子の「向き」を、バレーは「運動のあり方（状態）」を区別でき、いずれも量子情報として利用できる。スピンは実空間（物理的な位置や距離を示す）で表されるのに対し、バレーは波数空間（電子の運動方向と運動量を示す）で描かれる（縦軸はエネルギーE、横軸は波数ベクトルk）。グラフェンのバンド構造では、波数空間上に「Kバレー」と「K'バレー」が対称的に3ヶ所ずつ現れ、その違いは磁場や電気的な方法で検出できる。

はまだわかっていません。しかし、『モアレ超格子』をつくり、所定の操作をするとバレーの動きが電氣的に検出できることは知られています」と岩崎。モアレとは、規則正しく並んだ線や点などが重なり合うと生じる干渉縞のこと。特に、格子が規則正しく並んだ物質同士を重ね合わせたときに周期的に生まれる構造をモアレ超格子と呼ぶ。

岩崎が取り組んでいるのが、グラフェンと六方晶窒化ホウ素 (h -BN) を重ね合わせたモアレ超格子である。 h -BNはホウ素原子 (B) と窒素原子 (N) からなり、グラフェンと同様に六角形が平面状に並んだ2次元物質だが、両者は格子周期が異なるために角度を揃えて重ねた場合でもモアレ超格子が形成される(図2)。

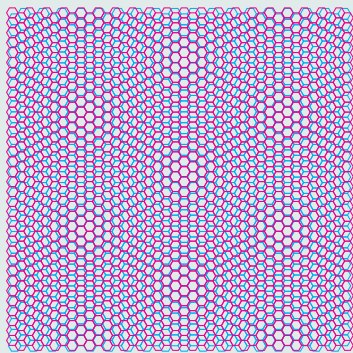
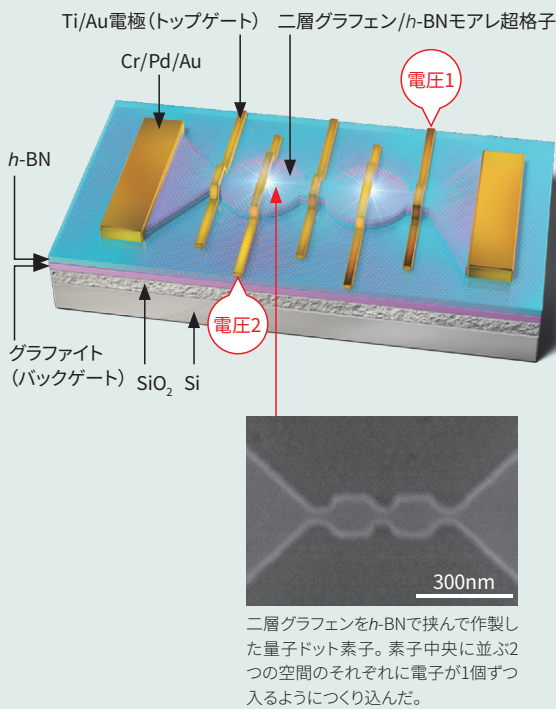


図2 グラフェンと h -BNのように、格子周期が異なる物質を重ねると生じるモアレ超格子。

図3 「二層グラフェン/ h -BNモアレ量子ドット素子」の構造と電気輸送測定の結果



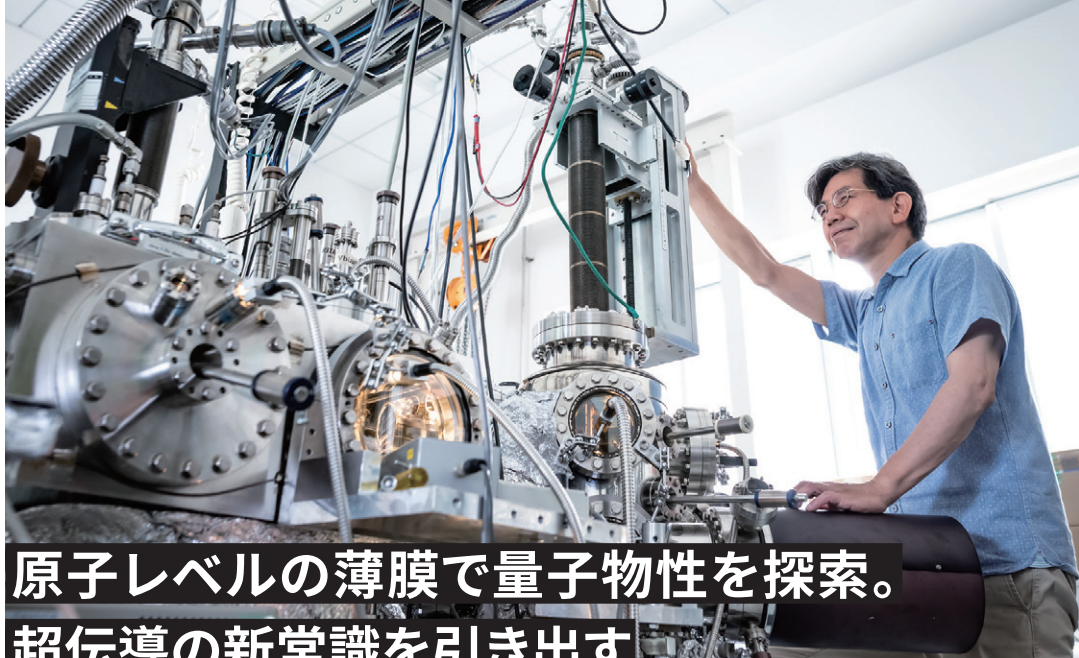
「モアレ超格子は、その重ね方の違いにより新たな物性が次々と見いだされているホットな分野です。以前、我々はモアレ超格子の特性を活かし、グラフェンのバレーに起因する電気信号の検出に成功しました。そこで、モアレ超格子と量子ドットを組み合わせればバレーの状態を制御できるのではないかと考え、二層グラフェン/ h -BNモアレ超格子による量子ドット素子の作製に着手しました。二層グラフェンを使うのは、バンドギャップを調整できるからです。今回私が作製したのは、量子ドットが二つ並んだ『二重量子ドット』と呼ばれる素子です(図3左)。この素子は、結晶角度を揃えて積層した二層グラフェン/ h -BN構造に微細加工を施し、電子1個分ほどの通り道を残して材料の不要な部分を削り取って作製しています。その上に複数の電極 (トップゲート) を形成し、そこに電圧をかけることで二層グラフェン中の電子の移動を制御するバリアをつくります。複数の電極の電圧をそれぞれ細かく制御することにより、電子を1個ずつ閉じ込め、その状態を制御することに成功しました」(岩崎)

これだけ精密な制御に成功した素子には、2次元物質同士を重ね合わせる際に気泡を発生させない転写法など、岩崎のノウ

ハウが詰め込まれている。

「電子輸送測定の結果から、量子ドット内に電子を1個ずつ閉じ込めることに成功したことがわかります(図3右)。しかし、今回の素子では、バレーの状態を読み取ることはできませんでした」と岩崎。その原因を岩崎は、「量子ドットをつくる際に素子を削ったことにより、グラフェンの端が崩れてしまったことが影響している」と考えている。量子状態とはそれほど壊れやすい状態ということだ。現在、材料を削るのではなく、電場を使って電子の通路の幅を調整する「ゲート定義型」の量子ドットの作製方法を探っている。

こうした高度な課題への挑戦を支えているのが、NIMSで谷口尚理事(MANA センター長兼任) が作製している世界最高純度の h -BNだ。岩崎の研究に限らず、2次元物質の研究は谷口の h -BNなしには開花しなかったといえる。唯一無二の研究材料が間近で手に入る環境は、岩崎の研究を強力に後押ししている。2次元物質の量子デバイスへの可能性は拓かれたばかりだが、岩崎らの飽くなき挑戦によって、量子マテリアル研究はますます面白くなるだろう。(文・池田亜希子)



原子レベルの薄膜で量子物性を探索。超伝導の新常識を引き出す

半導体基板上に金属薄膜を積層した2次元物質は、究極の薄さながらも超伝導現象を発現し、磁場に対しても驚異的な強さを示す。その物性を次々と解き明かしてきたのが、内橋 隆 MANA 副センター長だ。独自の計測技術を駆使して、新奇の物性を追い求め続けている。

常識破りの「2次元超伝導体」を発見

原子レベルの厚みしかない2次元物質。近年、バルク(塊)の結晶から剥離して得られるグラフェンなどが脚光を浴びているが、それ以前から、半導体基板上に原子1～2個の金属薄膜を積層した2次元物質に関する物性研究は盛んに行われてきた。その構造や電子状態を調べ、数々の物性を見いだしてきたのが内橋だ。

2011年には、シリコン(Si)基板上に積層したインジウム(In)原子層膜を極低温まで冷却すると、電気抵抗がゼロとなる超伝導現象が発現することを発見。「原子層膜では超伝導は発現しない」と考えられていた当時の常識を覆し、「2次元超伝導体」という新たな研究分野を確立した。また、超伝導体に磁場をかけると表面に「ボルテックス」と呼ばれる渦状の電流が発生するのだが、表面に段差(原子ステップ)をもつ2次元超伝導体では、渦がステップをまたいだ“異常なボルテックス”が形成されることを2014年に観測(図)。原子ステップが、量子コンピュータをはじめとした超伝導ナノデバイに不可欠な「ジョセフソン接合」として機能することを見だし、量子デバイス応用の可能性を示した。

超高真空・極低温で現れる量子物性

数々の発見の背景には、内橋独自の計測技術がある。多くの原子層物質は超高真空装置から取り出した瞬間に壊れてしまうが、内橋は、試料清浄表面の準備からその評価、電極の取り付け、電気伝導性の測定まで、超高真空環境を維持したまま一貫して実験が行える装置を組み上げた(上写真)。この装置では、強磁場(9テスラ)・極低温(400ミikelペン)という環境条件を実現し、物質表面の構造や電子状態を計測できる「走査型トンネル顕微鏡(STM)」の機能も統合するなど、唯一無二の計測環境を実現している。

2次元超伝導体はなぜ磁場に強いのか

2次元超伝導体の表面・界面で起こる物理現象は、今も内橋の探究心を刺激している。「一般的な超伝導体と比べて、2次元超伝導体は特定方向からの磁場にきわめて強いことが報告されていました。そのメカニズムに迫るため、超高真空・極低温での計測に加え、角度分解光電子分光法(ARPES)や第一原理計算を取り入れ、Si基板上のIn原子層膜に磁場をかけたときの電子状態とスピン状態を詳しく調べました。その結果、『ラシュバ型スピン軌道相互

作用』が磁場への耐性に関与していることが判明しました」(内橋)

通常の金属では、電子が動く方向とスピンの向きとの間に相関はない。一方、ラシュバ型スピン軌道相互作用が働くと、電子が動く方向に応じてスピンの向きが決まる。これは、電子の運動が乱れるとスピンの向きも乱れ、磁場中の電子のエネルギーに影響を及ぼすことを意味する。このことから、In原子層膜ではスピンの向きの頻繁な変化により電子のエネルギーの損得が相殺され、超伝導状態が維持できていたと考えられる。「2次元物質は、表面は真空中に、裏面は基板に接しており、それらがきわめて近接した状態です。だからこそユニークな物性の土壌となっており、今後も未知の現象を解き明かしていきます」(内橋)(文・山田久美)

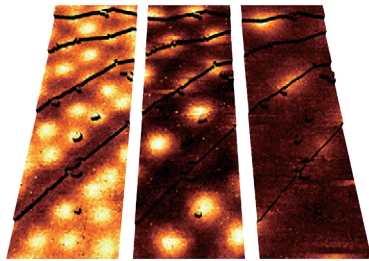


図 シリコン基板上にインジウム原子層膜を積層し、磁場をかけてSTM観察した像(左から、磁場0.08T、0.04T、0.00T)。明るい部分がボルテックス(渦)の中心にあたり、原子ステップ(黒い線部分)付近で“異常なボルテックス”が発生している様子が確認できる。

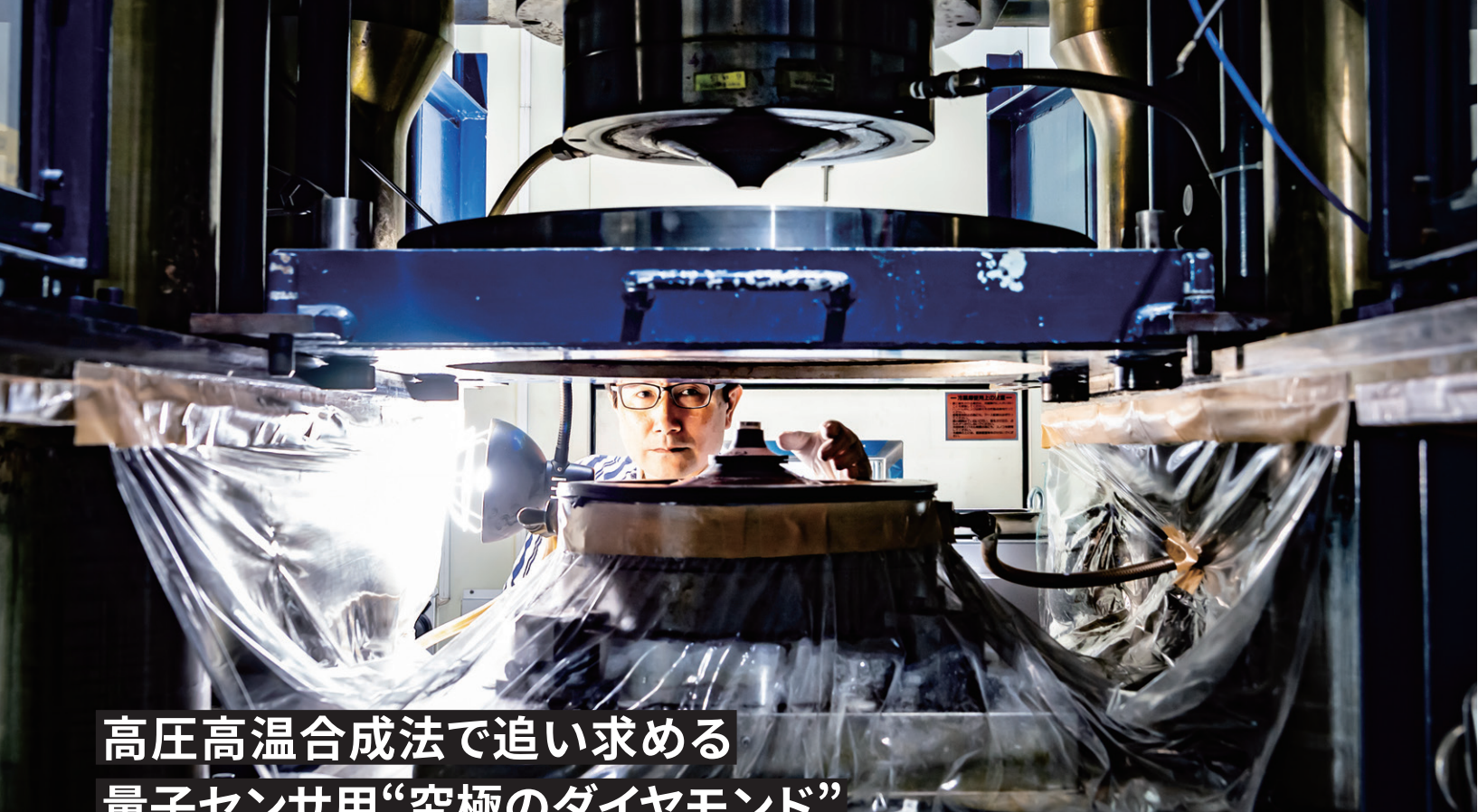
Research Highlights >>



内橋 隆

Takashi Uchihashi

ナノアーキテクトニクス材料研究センター
(MANA) 副センター長／
量子材料分野 分野長



高圧高温合成法で追い求める 量子センサ用“究極のダイヤモンド”

宝石としてだけでなく、その硬度を活かして切削工具などに利用されてきたダイヤモンド。今、磁場などの微小な物理量を高感度に検出できる「量子センサ」用材料という新たな期待を背負っている。その実現に不可欠なダイヤモンドの合成に「高圧高温法（HPHT法）」で挑んでいるのが宮川仁主任研究員だ。

量子センサへの応用を拓いた「NVセンタ」

2000年ごろ、ダイヤモンドの結晶中の「NVセンタ」と呼ばれる点欠陥を用いて、単一電子のスピン状態を制御できることが明らかとなった。ダイヤモンドは炭素のみからなる物質と言われるが、実際には窒素(N)が混入していたり、空孔(V)と呼ばれる炭素が抜け落ちた部分があったりする。この窒素と空孔が隣接する複合欠陥をNVセンタと呼ぶ(図1)。

NVセンタに存在する電子スピンの状態は、レーザやマイクロ波を照射(光励起)することにより、室温で光学的に観測できる。現在、この現象を利用したセンシング技術が脚光を浴びている。NVセンタの光励起による発光は、わずかな磁場や温度、圧力などの変化に敏感に反応する。つまり、NVセンタの発光強度の変化を測定することにより、磁場や温度などの環境変化を超高精度にセンシングできるというわけだ。これを「量子センサ」という。

ダイヤモンドは、室温で安定的にスピン状態を制御できる稀有な物質だ。大型の冷却装置がいらない小型で超高精度なセンサとして利用できる可能性を秘めている。ただし、その実現のカギを握るのがダイヤモンドの品質だ。

究極の結晶純度と最適なNVセンタ密度を求めて

NIMSでは、ダイヤモンドの合成技術として「マイクロ波プラズマ化学気相成長法(MPCVD法)」*と「高圧高温法(HPHT法)」の2種類を有する。MPCVD法に関しては、寺地徳之グループリーダー(P.3参照)が超高純度ダイヤモンドの合成をけん引。その取り組みは、既刊号でも紹介したとおりだ(Vol.21 No.4 P.10に研究紹介)。

一方、宮川が担当しているHPHT法は、高温・高圧下において、金属溶媒に溶かした炭素をダイヤモンドとして析出させるというものだ。宮川はその特徴をこう説明する。「HPHT法の長所は、天然ダイヤモンドが

安定して存在する熱力学的条件を人工的に再現し、そのなかでダイヤモンドを析出するため、MPCVD法に比べて結晶にひずみが入りにくいことです。ひずみは、電子スピンの量子状態を保てる時間(コヒーレンス時間)を低下させる一因となるため、それが入りにくいことは明確な強みです。一方、HPHT法の課題は、結晶の純度です」(宮川)

HPHT法は溶解・析出により合成するため、その過程で意図しない不純物がダイヤモンド結晶中に入り込みやすく、それがコヒーレンス時間の低下につながる。ダイヤモンドを量子センサとして利用するには、不純物をppmオーダー以下(0.0001%)に抑える必要があり、用途によってはppbオーダー(0.0000001%)まで低減することが求められる。

また、NVセンタの密度もセンサの性能に深くかわる。直感的には、NVセンタの数が多いほどセンサ感度が向上しそうにも思えるが、NVセンタの密度が高まることによって別の課題が生じると宮川は説明する。

「ほかのNVセンタがすぐ近くにあると、NVセンタ間の電子スピンの相互作用が強くなってしまい、それぞれのコヒーレンス時間が短くなってしまつトレードオフの関係があるため、必ずしもセンサ感度が高まるとは限りません。また、用途によって求められるコヒーレンス時間は異なりますから、それらを総合的に考慮して、ダイヤモンドの純度を高めつつNVセンタを最適に分布させるためのHPHT法の合成条件を、試行錯誤で探る日々が続いています」(宮川)

NVセンタ入りダイヤモンドのつくり方

HPHT法によるダイヤモンド結晶の合成プロセスは次の通りだ。

まず、ダイヤモンドの原料となる黒鉛(炭素)と、溶媒となる金属を高圧実験用セルに詰める。溶媒の底部には、種結晶となるダイヤモンドの粒が置かれている。

このセルを大型高圧装置に設置し、2日間程度、高温・高圧状態を保ち続ける。温度は1300～1500℃(溶媒組成や圧力に応じて調整)で、圧力は5～6ギガパスカルだ。これは1平方センチメートルの面積に対して約50～60トン(t)もの力がかかっている計算だ。軽自動車1台が約1tであることを思えば、相当な高圧だとわかるだろう。その結果、種結晶の上に、金属溶媒中の炭素がダイヤモンド結晶となって析出する(図2)。

この時点では、ダイヤモンド結晶中には原料由来の窒素が含まれる一方で、空孔はほとんど存在しない。そこで、析出した結晶を厚さ0.2～0.3ミリメートルの薄片に切り出し、電子線の照射によって空孔を生成させる。次いで、真空中1000℃に加熱して空孔を移動させることにより、窒素と空孔がペアとなったNVセンタがダイヤモンド結晶中に形成される。

金属溶媒の配合がカギ

「ダイヤモンドの純度を高め、NVセンタの密度を調整するため重要になるのが、炭素を溶かす金属溶媒の配合です。金属溶媒として代表的なのが、ニッケル(Ni)やコバルト(Co)、鉄(Fe)といった遷移金属元素です。また、HPHT法では通常、100～200

ppm程度の窒素が入りますが、その含有量を調整するため、窒素除去剤として働くチタン(Ti)やアルミニウム(Al)などの金属元素も添加します。それら金属の種類や量によって、窒素の除去効率がどれくらい異なるかなども調べています」(宮川)

一例として、宮川は窒素との親和性が高いTiをCo溶媒中に添加することにより、窒素濃度を100ppmから0.2ppmまで自在に制御することにも成功している。しかし、まだ課題があるという。

「炭素には¹²Cと¹³Cという安定同位体があります。このうち¹³Cの原子核には小さな磁石のようにふるまう『核スピン』があり、NVセンタのスピン状態に影響を及ぼすため、¹²Cの純度を高める必要があります。その点、寺地さんのグループではMPCVD法により¹²Cの純度を99.998%まで高めた¹²C濃縮ダイヤモンドの合成に成功しています。ただし、結晶のひずみが課題です。そこで、HPHT法の原料として、MPCVD法で大量に合成した¹²C濃縮多結晶ダイヤモンドを用いるという連携プレーにより、『ひずみのない超高純度ダイヤモンド』の合成に取り組んでいます。実際、その方法で作製したダイヤモンドはひずみが抑えられましたが、依然として局所的なひずみがわずかに存在し、それが結晶内でコヒーレンス時間のバラつく要因となっていることが明らかになりつつあります。そうした徐々に明らかになる課題に対し、2種類の合成技術をはじめ、長年のダイヤモンド研究で培った技術を駆使して対策を講じられるのがNIMSの強みです。量子マテリアルとしてのダイヤモンドに求められる条件はきわめて高いものですが、一步一步課題をクリアしていきます」(宮川)

(文・山田久美)



HPHT法で合成したダイヤモンド。用途に応じてNVセンタの密度を調整するため、炭素を溶かす金属溶媒の配合を調整するなど、最適な合成条件を探索している。窒素の含有量が多いほどダイヤモンドは黄みを帯びる。

*マイクロ波プラズマ化学気相成長法(MPCVD法) …真空チャンバー内に原料となるメタンガスを送り込み、プラズマで分解し、基板上にダイヤモンド薄膜を堆積していく手法。1980年代にNIMSの前身の無機材質研究所が開発した独自技術。NIMSがもつ高効率変換技術を用いることで、¹²Cメタンを70%以上の効率で¹²Cダイヤモンドに変換して大量に合成し、HPHT法の原料に用いている。

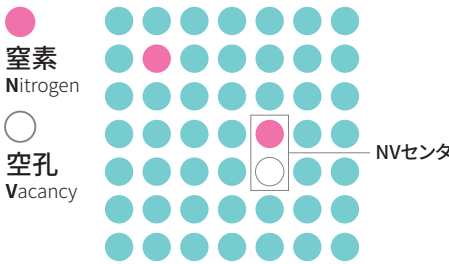


図1 窒素(N)を空孔(V)が隣接した複合欠陥

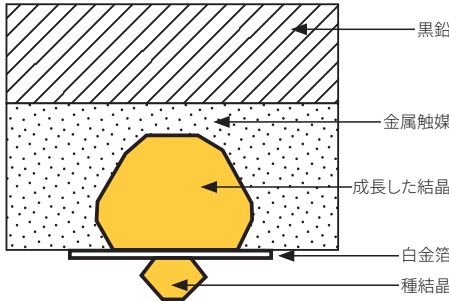
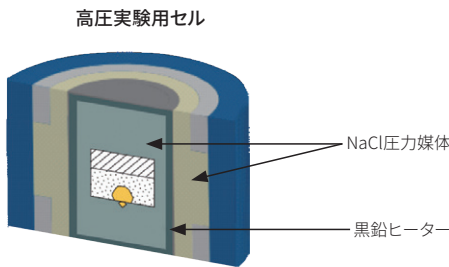
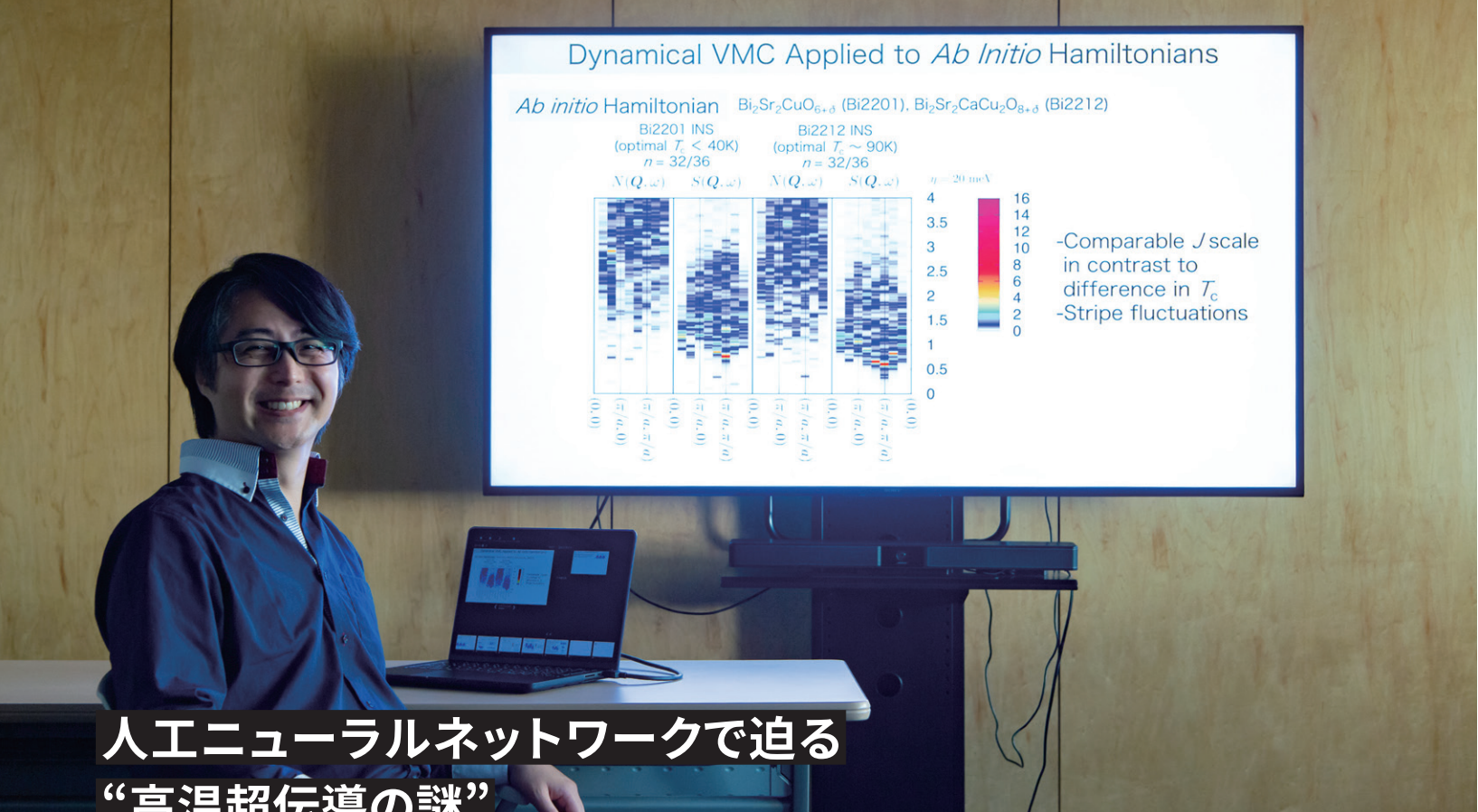


図2 高圧実験用セルの中に、ダイヤモンドの原料となる黒鉛(炭素)と、溶媒となる金属(金属触媒)、種結晶となるダイヤモンドの粒を封入し、高温高圧装置にセットする。ヒーター内部では地球深部の環境が再現され、種結晶の上にダイヤモンド結晶となって析出する。



宮川 仁
Masashi Miyakawa
ナノアーキテクトニクス材料研究センター
(MANA)
量子材料分野 超高压構造制御グループ
主任研究員



人工ニューラルネットワークで迫る “高温超伝導の謎”

ある温度以下になると電気抵抗が完全にゼロになる「超伝導現象」。極低温での超伝導の発現機構は分かっているが、それより転移温度の高い「高温超伝導体」の発現機構は謎のままだった。山地洋平グループリーダーは、その解明に機械学習と理論を組み合わせた独自手法で挑み、謎の解明につながる手がかりを発見した。

高温超伝導体の謎

2022年、その存在を実証した3名の研究者にノーベル物理学賞が授与されたことで話題となった「量子もつれ」。量子コンピュータの超越的な計算能力の原動力となっているこの現象は、実は「超伝導」とも深く関わっている。

超伝導とは、ある温度以下になると電気抵抗が完全にゼロになる現象だ。2個の電子間に引力が働き、「クーパー対」と呼ばれる“もつれた”電子のペアを形成することによって発現する。量子コンピュータにおける量子もつれが人工的に制御されたものであるのに対し、超伝導ではそれが自然に生じているというわけだ。

1911年、物理学者カマリン・オンネスが、水銀が4.2ケルビン（約−269℃）という極低温で超伝導を示すことを発見。その後、1960年代になって、実験によって電子間に働く引力の痕跡が観測されたことをきっかけに、「BCS理論」*が確立された。極低温

下で物質の電気抵抗がゼロになる現象のメカニズムは、BCS理論によって説明できる。

しかしその後、BCS理論では説明のつかない超伝導体が次々と発見されていく。従来の超伝導体が「低温超伝導体」と呼ばれるのに対し、それよりも転移温度が高い「高温超伝導体」である。

BCS理論によれば、多くの金属は電子間の引力が弱く、熱によりクーパー対は簡単に破壊されてしまう。そのため、金属は極低温でしか超伝導体にならないと考えられてきた。ところが銅酸化物を皮切りに、“例外”が続々と登場。現在に至るまで、高温超伝導の発現メカニズムは物理学者たちの間で議論的となっている。

電子間に働く強い引力の痕跡を求めて

高温超伝導の発現メカニズムをめぐる議論の渦中にいる山地はこう語る。
「高温超伝導体において、もつれ合った

クーパー対が高い温度でも生き残っていることをふまえると、電子間にはその高い転移温度に見合うだけの強い引力が働いていると考えられます。そこで、その痕跡を探す試みが世界中で続けられていますが、直接的な観測には至っていません」（山地）

かねてより、超伝導体の電子状態を観察する実験手法として重用されてきたのが、「角度分解光電子分光法（ARPES）」だ。これは、物質に光を当て、光電効果により飛び出してきた電子を観測することで、電子の運動量やエネルギー、バンド構造などを調べる手法だ。

ただし、電子の運動量やエネルギーなどの情報だけでは、電子同士がどのように引力を働かせ、超伝導を引き起こしているかまでは分からない。その解釈に不可欠なのが、第一原理計算をはじめとした数値計算だ。量子力学の基礎的な方程式を出発点とし、物質の電子状態を精密にシミュレーションした計算結果を観測データと比べて理論解析することにより、電子同士の相関

を理解することができる。山地らは、スーパーコンピュータ「富岳」をはじめとする大規模計算機を使い、量子もつれが決定的な役割を果たす物質の機構解明に取り組んできた。

「BCS理論が構築されたころは、コンピュータがこなせる計算量は小さなものだったが、近年はスーパーコンピュータを使って大規模な計算が実施可能です。とはいえ、金属のように電子の数が膨大かつ、それらがもつれた状態の『量子多体系』の場合、電子のふるまいを数式化した波動関数もきわめて複雑なものとなり、最新鋭のスパコンをもってしても、計算だけで電子間に働く強い引力の痕跡を探るのは困難です」（山地）

そうしたなか、山地らは2021年11月、「銅酸化物において、高い転移温度に見合う強い引力が電子間で働いていた痕跡を観測データから確認した」と発表。そのカギとなったのが、人工ニューラルネットワーク（ANN）を用いた独自の解析手法だ。

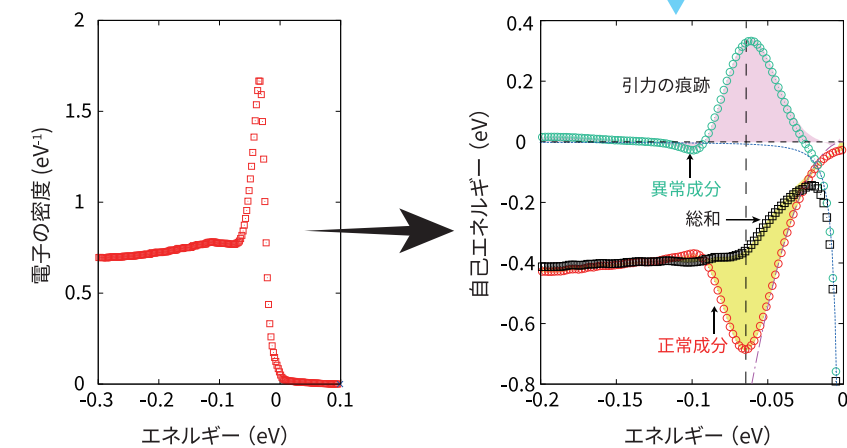
人工ニューラルネットワークで 観測データから “隠れた物理量”を引き出す

山地らがベースとしたのは、光電子分光によるピスマス系銅酸化物の観測データである。自らの研究アプローチについて、山地はこう説明する。

「光電子分光で観測されるスペクトルには、電子がもつ『自己エネルギー』と呼ばれる物理量が反映されています。ここには一つの電子が、物質内部で他の電子や格子振動（フォノン）、イオンなどから受けた相互作用の履歴が現れます。自己エネルギーには、常に存在する『正常成分』と、超伝導状態になったときだけ現れる『異常成分』の2種類があります。この異常成分だけをうまく抽出できれば、超伝導の原因である電子間の引力について調べられますが、観測データは両成分が重なり合っているうえに、ノイズも含まれます。そこから未知の異常成分だけを抽出するには、多くの情報を仮定しなければならず、解析はきわめて困難です」（山地）

この異常成分の抽出の困難さという課

図 銅酸化物の光電子分光データ（左図）から、足りない情報を普遍的な物理法則で補って人工ニューラルネットワークを最適化し、自己エネルギーの2つの成分（右図）を決定した。



題は低温超伝導体の場合も同様につきまとう。ただ、低温超伝導体の電子状態は、高温超伝導体と比べれば、電子間に働く相互作用が比較的シンプルだ。そのため、BCS理論やノーベル賞受賞者の南部陽一郎氏が提唱した「自発的対称性の破れ」など、複数の理論を組み合わせることにより、不明な情報の大部分を推定することが可能だ。

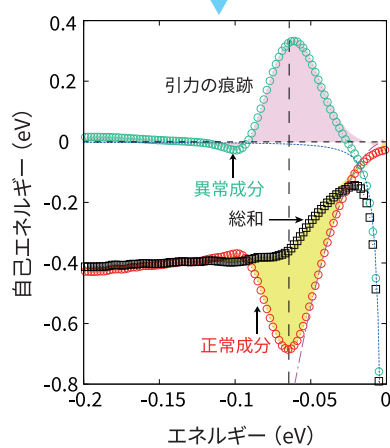
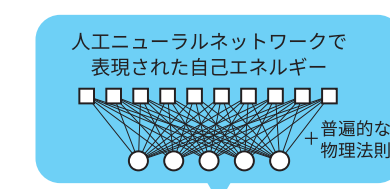
一方、高温超伝導体の電子状態は、スピンや電荷など多様な相互作用が絡み合うため、同様の手法を適用することができない。

そこで導入したのがANNだ。ANNを用いる利点は、スパコンをもってしても計算が難しい複雑な関数を、よりコンパクトな関数で表現できることである。

山地らはANNに、ピスマス系銅酸化物の観測データに加え、普遍的な物理法則を学習させ、観測データのスペクトルとANNで得られたスペクトルが一致するように学習を繰り返させた。それにより、光電子分光の観測データから正常成分と異常成分、それぞれの物理量を計算することに成功した(図)。

「得られた結果から、これまで観測データから強い引力の痕跡を観測できなかった理由が、正常成分に含まれる電子間の散乱と相殺されて、見かけ上、強い引力の痕跡が消し去られていたからだと分かりました。また、異常成分を詳細に解析した結果、高

Research Highlights >>



温超伝導体の電子同士に働く引力と、低温超伝導体の電子同士に働く引力とは、そのメカニズムが異なることも分かってきました。ただ、世界中の研究者がそれぞれの説を唱える競争の激しい分野ですので、研究コミュニティ全体に納得のいく説明ができるよう、シミュレーションからもメカニズム解明に挑んでいます」と山地。独自手法を発展させ、さらに高温超伝導の謎解明に切り込んでいく。

*BCS理論…1957年にバーディーン、クーパー、シュリーファーの3氏によって提唱された理論で、結晶固体の量子化された振動によって電子がペアを組み、超伝導状態となることを示した。

(文・山田久美)



山地 洋平

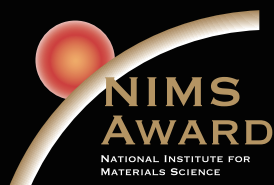
Yohei Yamaji

ナノアーキテクトニクス材料研究センター

(MANA)

量子材料分野 量子特性モデリンググループ

グループリーダー



NIMS AWARD SYMPOSIUM 2025

持続可能社会を切り拓くエネルギー関連材料と技術
- ペロブスカイト太陽電池 -

Date / Venue

11/11^火 2025つくば国際会議場
中ホール 300

NIMS Award 2025 Winners

「ペロブスカイト太陽電池」の研究開発における
先駆的かつ実用化に向けた顕著な貢献

宮坂 力 氏
桐蔭横浜大学 教授

Henry J. Snaith (ヘンリー・J. スネイス) 氏
オックスフォード大学 教授

Nam-Gyu Park (ナムギュ バク) 氏
成均館大学 教授

Invited Speakers

杉山 正和 氏
東京大学

Yi Hou 氏
シンガポール国立大学

若宮 淳志 氏
京都大学

村上 拓郎 氏
産業技術総合研究所 (AIST)

竹岡 裕子 氏
上智大学

金子 幸広 氏
パナソニック ホールディングス株式会社

* 講演順

Registration



<https://www.nims.go.jp/nims-award-symposium/ja/>

入場無料

Supported by

MINISTRY OF EDUCATION,
CULTURE, SPORTS,
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN国立研究開発法人
科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency

NIMS NOW vol.25 No.4 通巻211号 2025年10月発行

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

購読申し込みフォーム
下記FAX、E-mailでも承ります。

R200

古紙配合率 60% 再生紙を
使用しています

植物油インキを使用しています

ISSN 2436-3502

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1 TEL 029-859-2026 FAX 029-859-2017 E-mail inquiry@nims.go.jp Web www.nims.go.jp

禁無断転載 © 2025 All rights reserved by the National Institute for Materials Science

表紙: 量子ビット材料開発において特性試験に用いる「希釈冷凍機」 写真: 石川典人 デザイン: Barbazio株式会社