

NIMS NOW No. 4

マ
テ
リ
ア
ル
が
開
く

ま
だ
見
ぬ
量
子
の
世
界

マテリアルが開く まだ見ぬ 量子の世界

決して破られることのない量子暗号通信や、瞬時に膨大な計算を行う量子コンピュータ。

こうした量子技術の実用化が間近に迫っている。

既存技術ではなしえない「離れ業」が可能なのは
量子力学の理論から導かれる、一見不思議な現象や状態を利用しているからだ。

しかし、そのような現象や状態は、現れる条件に限られる上に、

上手に操らないとたちまち消えてしまう。

そこで重要になるのが、量子技術の舞台となるマテリアルだ。

量子技術を発展させ、次の世界を開く
量子マテリアル研究の「今」はどうなっているのだろうか。

寺嶋 太一

Taichi Terashima

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)
ナノシステム分野 量子物質特性グループ
グループリーダー

古月 暁

Xiao Hu

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)
MANA主任研究者
同 ナノシステム分野 ナノシステム物性理論グループ
グループリーダー

谷口 尚

Takashi Taniguchi

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)
拠点長

研究者座談会

NIMSの蓄積が花開く
量子マテリアル開発

近年、注目を集める量子技術。

国は、この新しい分野に取り組む「量子技術イノベーション戦略」を策定し、
その中で「量子マテリアル」の研究開発をNIMSが担うことになった。

総勢40名以上が参加するこのプロジェクトの中核を担う3名に、背景と意気込みを聞いた。

量子技術への
期待を支えるマテリアル——量子技術が注目されるようになったのは
どうしてでしょうか？谷口：量子通信、量子情報処理、量子セン
シングなどの量子技術が、よりよい豊かな暮
らしや安全な社会の実現につながると期待されているからだと思います。特に注目が
高まったのは、2019年にグーグルが「量子
コンピュータが従来のコンピュータを上回る
計算能力を達成した」と発表し、実用化の
可能性を皆が感じるようになったためです
う。量子コンピュータを使えば、薬の候補を
現在よりもはるかに短い時間で見つけれ
るという話も聞きます。

古月：コンピュータに限らず、現状の技術に

は限界が見えているところもあるために、量
子技術への期待が高まっているという側面
は確かにありますね。一方で、近年、物性
理論の新しい展開もありますし、ナノ加工技
術や計測・評価技術もめざましく発展してい
て、量子技術を実現できる基盤が整ってき
たということも、量子技術が注目されるよ
うになった理由の一つだと思います。

寺嶋：これまでの技術では、電子は「電気を

もった粒」、「磁石のもとになる粒」として扱
われてきましたが、古月さんがいわれたよう
に、このような見方では応えきれない技術
的な要望がいろいろ出てきた。そこで、もっ
と積極的に量子力学的な性質を役に立て
ようという流れが出てきたのだと思います。古月：実は、これまでの技術にも量子力学的
な性質は利用されているんですよ。たと
えば、量子力学に基づく「バンド理論」に
よって、固体中の電子が存在できるエネルギー
帯(バンド)は決まり、この知識を利用するこ
とで半導体技術は大きく発展しました。しか
し、現在の量子技術開発では、電子のエネ
ルギーにとどまらず、電子や光の波動関数
そのものを操作しようとしています。寺嶋さ
んのいう「もっと積極的に」という流れが加
速していると感じますね。——そうした流れの中で、量子マテリアルと
はどういうものだとらえていますか？古月：国の量子技術イノベーション戦略では、
「量子状態を精密制御することで機能を発
現する物性・材料」が量子マテリアルである
とされていて、私の考えはこれに近いです。
量子状態を制御するには、材料を加工したり
、2種類の材料を接合したりする場合も
多いので、量子マテリアルと言っても一つの
材料に限定されるわけではないと思います。

寺嶋：私がイメージするのは、トポロジカル

物質(p8囲み参照)や超伝導体などです。
こうした物質の中では、「電圧をかけると動
く電気の粒」という描像とはまったく違う電
子の性質が現われるからです。谷口：私は「量子マテリアル」というものを、
もっと広くとらえています。実際に量子技術
を活用するときには、量子状態を発現する
コア材料だけでなく、土台となる基板など
様々な材料が必要ですし、周辺の電子回路
による制御も必要です。そういうものを全
部ひっくるめて「量子マテリアル」といいよ
いのではないかと思います。

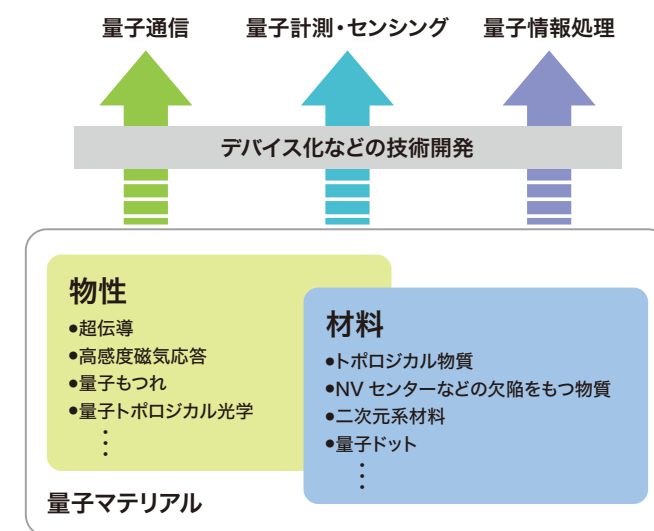
次々に登場するプレーヤーたち

——量子状態を発現する材料として、注目
しているものは何ですか？谷口：私は自分も合成研究に携わっている
ダイヤモンドに注目しています。ダイヤモン
ド中の欠陥からの発光を利用した磁気セン
シングは、かなり実用化に近いところまで
進んでいます(p10参照)。磁場の変化を
光で遠くから室温で検出できるので、MRI
(磁気共鳴画像法)がどこでも簡単に使え
るような時代がくるかもしれません。一方
で、ダイヤモンドのこの特性のよいところを
取った新たな材料が発見されるとおもしろ
いと思っています。

もう一つ注目しているのは二次元系(平

面状)の材料です。特に、グラフェンは最近
になって非常に新しい展開があり、今回の
NIMS Awardの授賞対象にもなっています
(p7参照)。古月：2011年にマクドナルド先生が「ねじれ
二層グラフェン」(グラフェン[炭素原子が
ハニカム状につながった平面状物質]をわ
ずかに回転させて2層重ねたもの)が非常
に特殊な波動関数をもつという理論予測
をし、2018年にハリーヨ-エレーロ先生が
実際に作成して、超伝導を示すという驚き
の発見をしました。さらにその後、磁性やト
ポロジカル特性も示すことがわかってしま
した。こうした計測は、谷口拠点長らが合成
された高純度の窒化ホウ素基板があったか
らこそ実現したものです。ねじれ二層グラ
フェンは、応用にはまだ時間がかかりそう
ですが、シンプルな構造で欠陥もほとんどない
上に、回転角度を変えることで性質が変わ
るので、量子状態の理解と制御の研究に大
きく貢献すると思います。

——もう一人の受賞者である安藤先生は？

古月：物性理論の大家で、グラフェンやカー
ボンナノチューブなどの量子特性を基礎か
ら解き明かしました。また、1980年に発見
された「量子ホール効果」という現象を、発
見の数年前に理論的に示唆されていまし
た。量子ホール効果は、トポロジカル物質と量子技術イノベーションと量子マテリアル
国の戦略における量子マテリアルの位置づけのイメージ

量子とは

エネルギーなどの物理量は連続的に見えるが、どんどん小さ
くしていくと最小単位がある(値が飛び飛びになる)。この最
小単位を「量子」と呼ぶ。電子や光などの性質や振る舞いを
量子という概念と関係づけて説明する理論が「量子力学」で
ある。量子力学では、電子は粒子でありながら波としての性質
をもつと考え、電子を波動関数(波の広がり方を表す数式)で
表すことにより、その性質や振る舞いを理解する。一方、電磁
波である光も粒子(光子)としての性質をもつと考える。「量子
技術」では、量子力学で説明される独特の現象や物質の状態
を利用する。

いう概念が確立するきっかけとなった現象です(p8参照)。

寺嶋:トポロジカル物質には非常に興味をひかれますね。トポロジカルという概念が出てくる前は、物質には電気が流れるか流れない物質の中に「トポロジカルなもの」と「そうでないもの」があるというふうに変った。これは、固体物理の非常に基礎的な概念の変革と結びついた新しい理論であり、研究として追究していくのは非常におもしろいと思っています。

合成、計測・評価、理論の3本の矢をもつNIMS

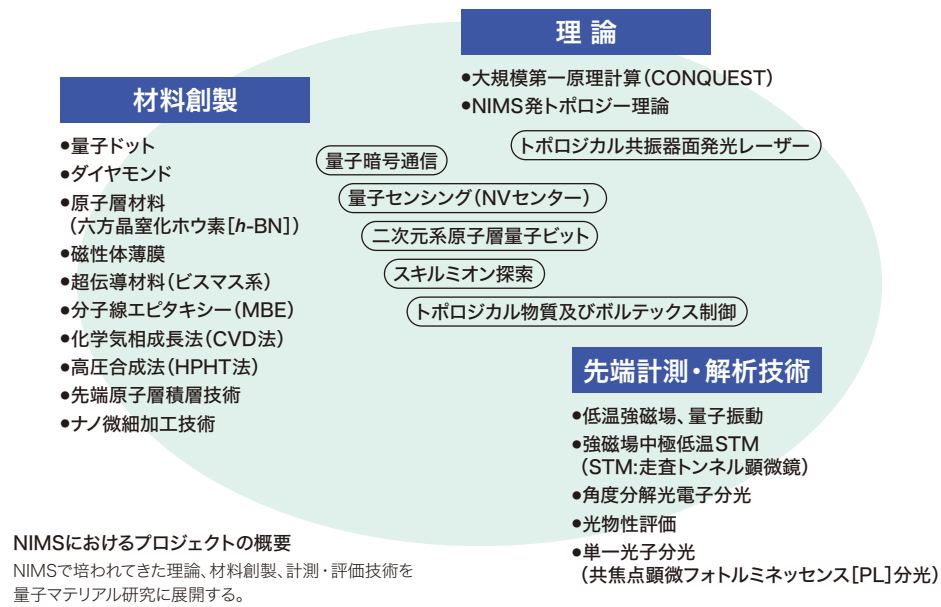
——NIMSのプロジェクトの目標は？

谷口: 実用化に近い分野で欠けているピースを提供するといった短絡的な目標は立っていません。量子マテリアルの研究開発はそんなに甘いものではないですからね。それよりも、物質・材料の基礎基盤研究を進めることで、次の世代につながる新しい材料の発見や、基本的な物質の高度化に貢献していきたいと考えています。

このプロジェクトでは、最初にもいったように量子マテリアルの範囲を広くとらえており、テーマはトポロジカル物質、量子通信、光の取り出しなど様々です。私はプロジェクトの取りまとめだけでなく、ダイヤモンドや窒化ホウ素の合成技術の研究もしていますが、量子マテリアルはNIMSの強みが生きる分野だとつくづく感じています。

まず、NIMSには前身の二つの研究所の時代からの材料合成技術の蓄積があり、大型の合成装置もある。そして、合成した材料をすぐに評価してくれる人材もあり、そのための高度な計測装置もある。量子マテリアルの性能は微量の不純物に左右されるので、内部で評価してもらえれば、評価結果を詳しく議論できるのがありがたいですね。さらに、たとえば、ダイヤモンドより性能のよい材料を探そうとすると、やみくもに進めるのではなく、どこに着目すればよいか相談できる理論家もいます。

量子技術イノベーションに向けた物質・材料の基礎基盤研究



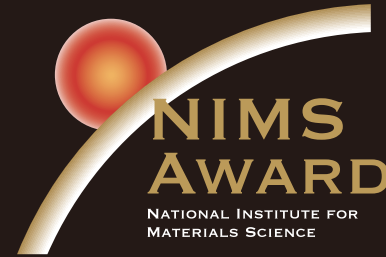
寺嶋: おっしゃる通りですね。私たちのチームは、トポロジカル物質と超伝導体を組み合わせたときに現れると予想されている特異な粒子の観測を目指していますが (p9参照)、試料をつくる研究者と様々な計測法を専門とする研究者がいます。プロジェクトの外にも、いろいろなノウハウをもつ人がいてその助けを借りることもできます。

古月: 私はプロジェクトの中で「量子トポロジカル光学」という分野を追求しており、先進的なレーザー「TCSEL」の開発をチームで進めています(p8参照)、理論家としての貢献という点では、現象の背後にある普遍的な原理を見つけて、材料開発の指針を提供したいと思っています。

——最後に、今後の展望をお聞かせ下さい。

谷口: 現状では、「量子技術」という言葉が示す内容は混沌としており、これから研究開発が進む中で皆が自分なりの定義づけをし、それを持ち寄ることで概念ができあがっていくのではないかと感じています。我々のプロジェクトは世界から見れば小規模ですが、マテリアルから攻めることで、今は予想もされていないような量子技術を生み出せる可能性がある。そうした成果をあげて量子技術の概念を広げられたら愉快だなと思っています。

(文・青山聖子)



受賞者コメント

NIMSが毎年、物質・材料に関わる科学技術分野において飛躍的な進歩をもたらした個人、グループを対象に授与しているNIMS Award。2021年度は「量子マテリアルに関する研究」の分野から、グラフェンなどを利用する次世代量子デバイス開発に突破口を開く安藤氏の「低次元物質の量子物性に関する理論基盤の構築」並びにマクドナルド氏及びハリーヨ-エレロ氏の「ツイストロニクスによる量子物理に関する先駆的研究」が受賞しました。



安藤 恒也 氏

東京工業大学 名誉・名誉教授
東京大学名誉教授

Q.1 二次元電子系の研究を始めたきっかけは？

MOSFETのシリコン表面反転層の強磁場下の伝導率の測定結果が報告されたことです。表面反転層が二次元系であることに着目し、強磁場下二次元電子系の対角伝導率とホール伝導率の理論計算を行いました。その後、整数量子ホール効果及び分数量子ホール効果が発見され、この分野は大きく発展しました。この研究で半導体デバイス自身に新しい物理学が潜んでいることを体験し、これを契機にデバイスに密着した低次元系の電気伝導や光吸収などの物性研究に取り組むことになりました。

Q.2 グラフェンの研究に取り組んだ理由は？

相対論的な極限で電子は速度一定（光速）で運動します。グラフェン上の電子の運動は形式的にこの相対論的な極限と同じです。カーボン・ナノチューブはこの電子を円筒表面に閉じ込めたものとして理解できます。そのような系が示すおもしろい性質に興味をもち、発見されたばかりのナノチューブと、つくられる前のグラフェンの理論研究を始めました。その後、実際にグラフェンがつくれ、その研究が大きく発展しました。しばらく前に大学を定年退職しましたが、現在までグラフェンの電流磁気効果の理論的研究を続けています。



アラン H. マクドナルド 氏

Allan H. MacDonald

テキサス大学オースティン校
物理学教授

Q.1 受賞研究に取り組むことになったきっかけは？

二層グラフェンにねじれが生じると、その中にある電子の運動速度が低下することが過去の研究で明らかになっていました。私が当時理解していたのは、この電子挙動が、ねじれ角度が小さくなる極限において、1) 電子構造の様々な微視的詳細とは無関係であること、2) 定式化が複雑であること、3) 強い電子相関を引き起こす可能性があることでした。しかし「小さなねじれ角度では何か起きるのか?」という素朴な疑問に対する切れのよい答えは見つかっておらず、理論の力の見せどころでした。そこで私はボストク研究員の Rafi Bistritzer とともに、モアレ超格子の物理特性をとらえるシンプルな理論を構築し、それを使って複数の「マジックアングル」を発見しました。この研究にはもう一つ重要な目標もありました。それは、モアレ超格子の周期と原子格子レベルの周期との間の整合性に由来する影響が、ねじれ角度が小さい極限で顕在化しない理由を明らかにすることでした。

Q.2 受賞研究を今後どのように発展させていきたいですか？

我々のねじれ二層グラフェンの初期研究は、二次元半導体・二次元半金属の間に生じるモアレパターンは様々な人工結晶になり、それらユニークなモアレ物質は手のひらの上の宇宙を与えてくれることを示しました。私はこのアプローチを応用して、制御可能な人工結晶の可能性を拡げていきたいと思っています。マジックアングルをもつ二層グラフェンの物性、例えばその超伝導・量子異常ホール効果などは、絡み合う電子バンドのトポロジカル効果によってバルク結晶に現れるものとは一線を画したものになっています。一方、(我々が初期研究の数年後に明らかにしたように) モアレ構造をもつ遷移金属ダイカルコゲナイドの性質は、ハバードモデルによって記述される一般的な強相関バルク物質と非常によく似ています。これは今研究されている二つの事例です。モアレ物質の形成によってどのような電子的・光学的特性が創発されるか、その発見がまだ始まったばかりなのです。



パブロ ハリーヨ-エレロ 氏

Pablo Jarillo-Herrero

マサチューセッツ工科大学
セシル&アイダ・グリーン物理学教授

Q.1 受賞研究に取り組むことになったきっかけは？

私がねじれ二層グラフェンの研究に取り組むようになったのは、結晶格子間の角度が、物理学および材料科学の歴史において解明されていなかった、分野の新しい扉を開く「ドアノブ」だと思ったからです。このドアノブをいろいろな角度から分析することで、興味深い驚きや発見が得られると確信しました。量子物質は大変複雑な研究対象ですが、この未知の領域に思い切っ飛び込めば、新たな発見がきっと待っていると思ったのです。

Q.2 受賞研究を今後どのように発展させていきたいですか？

私は今後もモアレヘテロ構造をもつ新奇なシステムの研究を続けていきたいと思っています。これらのシステムは、現代物理学における最も興味深い二つのテーマである、電子間の強い相関、および電子バンドのトポロジを包括的に研究できる対象だと考えています。将来的には複雑な量子の振る舞いの出現に欠かせない主要素を解明したいですね。また、同僚のエンジニアたちがこの基礎知識を基に新たな量子技術を開発してくれることも期待しています。

光のトポロジーを活用して トルクをもつレーザー光をつくる

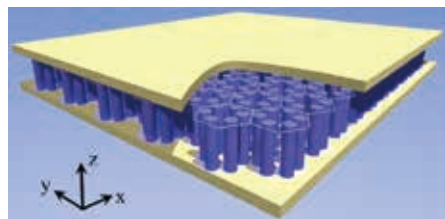
古月 暁

Xiao Hu

物質トポロジーを生かした量子技術には電子の量子状態を利用するものが多いが、古月暁は光に魅力を感じている。電子を使う場合は現状では極低温や高磁場といった条件が必要だが、光なら常温、磁場不要で機能するデバイスをつくれるからだ。その一つとして、量子マテリアルプロジェクトでは、高性能なレーザーの開発に取り組んでいる。

平面状のトポロジカル絶縁体（下の囲み参照）では、試料のフチを電子がぐるぐる回るのに、中央部分は絶縁体のままという現象が起こる。古月は、同じ現象を電子ではなく光で起こせないかと考えた。しかし、トポロジカル絶縁体では電子のスピンの重要な役割を果たしているが、光にはスピンはない。そこで古月は、スピンと同様の効果を生み出す方法を理論的に検討し、誘電体の円柱をハニカム状にたくさん並べる仕組みを考案した。2015年のことだ。

古月が狙った現象は、構造体が小さいほど短い波長で起こるため、光で起こすには太さ数十ナノメートル・高さ数マイクロメートルの誘電体の円柱の配列を規則正しく作り込む必要がある。しかし、その加工は非常に困難だ。そこでまず、太さが数ミリメートルもある円柱と、光よりもずっと波長の長いマイクロ波で概念を実証しようと考えた。実験で、マイクロ波は理論予想通り試料のフチを回った。この成功により、半導体薄膜に超微細構造をつくりこめば、光でも同じ現象が起こるという見通しが立った。古月はこのような構造体を「トポロジカルフォトニック結晶」と名づけた。



トポロジカルフォトニック結晶の模式図

誘電体の円柱をハニカム状に並べたもの。平面状の結晶のフチを光がぐるぐる回る。

古月は、この結晶を利用して高性能なレーザーをつくろうと考えた。ここでも理論計算を行った結果、ハニカムの形をわずかに変えると結晶はトポロジカル特性を示さなくなることがわかり、この結晶でトポロジカルフォトニック結晶を囲めばレーザー発振が起こると予想された。これらのフォトニック結晶は、海外の共同研究者がナノ加工技術を駆使して実現し、2019年にレーザー発振を確認することができた。

このレーザーの波長は1.55マイクロメートル（近赤外域）だった。今回、古月らが量子マテリアルプロジェクトで目指しているのは、もっと波長が短い緑色や青色など可視光のレーザーだ。「トポロジカルフォトニック結晶からのレーザー光にはトルク（回転力）をもたせることができ、DNAなど微細な試料を操作するのに適していますが、そのためには波長を短くしないといけないからで

す」と古月は説明する。

しかし、発振波長を短くするには半導体フォトニック結晶の構造をさらに超微細化する必要がある。合わせて、光に左巻きや右巻きのトルクを選択的に発振させるための技術も開発しなければならない。古月は、チーム内の実験家とともに、こうした課題に挑む。

（文・青山聖子）



レーザー発振に用いる2種類の結晶の断面図（模式図）

左は、トポロジカルフォトニック結晶。右は、それとペアになるトポロジカル特性を失った結晶。右の結晶で左の結晶を囲むことでレーザー発振に必要な共振器ができる。

トポロジカル物質とは

数学の一分野であるトポロジー（位相幾何学）では、物体を連続的に変化させても変わらない性質に着目して物体を分類する。たとえば、ドーナツもコーヒーカップも穴の数は1なので同じ分類になるが、ボールは穴の数が0なので別の分類となる。

1980年代以降、このような分類を物質の電子状態（波動関数の形）に適用す

ることで、従来とは異なる物質の分類ができることが、理論と実験の両面から次第にわかってきた。そして2005年、「トポロジカル絶縁体」という概念が提唱された。絶縁体には、普通の絶縁体と、それとは分類が異なるトポロジカル絶縁体があり、両者が接するところではトポロジカル絶縁体の表面が量子特性をもつ伝導体に変化すると予想されたのだ。その

量子技術の幻の主演 「マヨラナ粒子」を捕まえろ！

寺嶋 太一

Taichi Terashima

1937年にその存在が予言された「マヨラナ粒子」。粒子と反粒子の区別がつかないという変わった性質をもつ。その存在については間接的な証拠しか得られていないが、超伝導体中にも現れるとされ、量子コンピュータへの応用が期待されている。このため、この粒子の発見競争が世界的に繰り広げられている。寺嶋太一らは量子マテリアルプロジェクトでこの競争に加わる。

マヨラナ粒子を観測する方法はいくつか提案されている。このうち、寺嶋らはトポロジカル絶縁体の薄膜を超伝導体の上に重ねた試料を使う。こうするとトポロジカル絶縁体の表面で超伝導が起こり、そこに磁場をかけたときに生じる渦糸の中にマヨラナ粒子が存在すると理論から予想されている。

この方法は現在さかんに研究されているが、トポロジカル絶縁体は10種類以上発見されており、超伝導体も様々なタイプのものがあるため、組み合わせ方はたくさんある。寺嶋らは、トポロジカル絶縁体としては、よく知られたBi₂Se₃（ビスマス2セレン3）だけでなくPb（鉛）の化合物なども使い、超伝導体は鉄系の複数種類を用いる。いずれもチーム内で合成することを基本としている。

マヨラナ粒子の発見競争の中で、NIMSの強みはどこにあるのだろうか。「一番大きいのは、電子状態を計測する様々な手法の

エキスパートが揃っていることです」と寺嶋は答える。

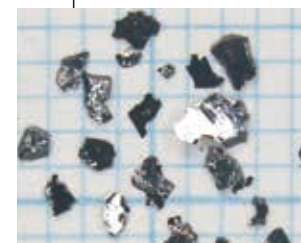
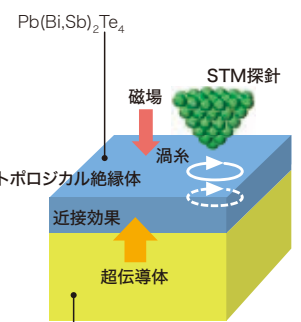
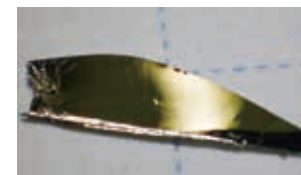
そもそも、マヨラナ粒子を出現させるには、トポロジカル絶縁体がトポロジカル絶縁体としての特性をきちんともっていなければならない。「トポロジカル絶縁体では、組成が少しずれることで電子が抜けたり、余分に入ったりすることがあるため、注意深く合成することはもちろんですが、その上で使用前に電子状態を確認する必要があります」

寺嶋らの計測手法はまずこの段階でも活用されているが、さらに威力を発揮すると期待されるのが、マヨラナ粒子の観測の段階だ。一番強力なのは走査トンネル顕微鏡（STM）で、渦糸中のマヨラナ粒子を直接検出できる。寺嶋が得意とする量子振動では、電子がとることのできるエネルギーの範囲が詳しくわかり、角度分解光電子分光（ARPES）では、エネルギーと運動量の関係

が一度にわかる。

とはいえ、現在はどんな試料が観測に適するかを手探りで探っている段階だという。3つの計測手法の組み合わせで観測に成功する日が待たれる。

（文・青山聖子）

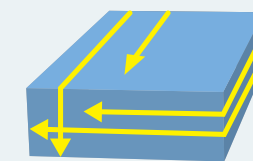


鉄系超伝導体

Ba_{0.58}K_{0.42}Fe₂As₂

マヨラナ粒子の観測方法

トポロジカル絶縁体に超伝導体を接触させて、トポロジカル絶縁体の表面に超伝導を誘起する。この状態で磁場を加えたときに生じる渦糸にマヨラナ粒子が存在すると理論的に予言されている。このため、寺嶋らは図のような試料をつくってマヨラナ粒子の観測を試みることを計画している。上下の写真は使用する物質の例。



トポロジカル絶縁体

普通の絶縁体は表面も内部も電気を通さず、金属（伝導体）は表面も内部も電気を通す。トポロジカル絶縁体は、内部が絶縁体だが、表面は電気を通す。

後、実験で真空中や空気中（どちらも普通の絶縁体である）で表面にだけ量子化された電流が流れる物質の存在が確かめられ、この理論が裏付けられた。

トポロジカル絶縁体と同様に、トポロジカル超伝導体の存在も理論から予測

されており、その実現や量子計算への応用がさかんに研究されている。

トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体のように、トポロジーの違いにより特異な性質を示す物質を「トポロジカル物質」と呼ぶ。

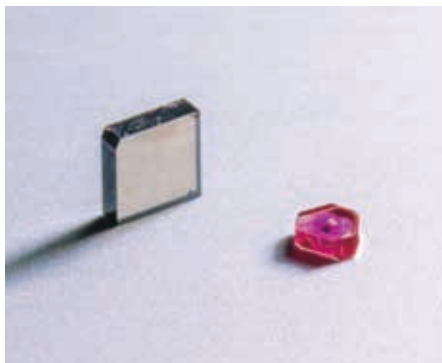
卓越の成長技術で赤い光を操る 量子センサー用ダイヤモンド

ダイヤモンドは、宝飾品として人々を惹きつけるだけでなく、最高の硬さをもつ工業材料として広く使われ、また新規な半導体材料としての研究開発も行われている。そこに最近、高性能なセンサーを実現するための量子材料という顔が加わった。センサーの実用化には複数の要求性能を満たすダイヤモンドが求められ、精密かつ高度なダイヤモンド成長が必要だ。量子材料プロジェクトの中で、寺地徳之のチームはこの難題に取り組んでいる。

室温で使える量子材料

高校化学の教科書では、ダイヤモンドは炭素のみが連なる結晶と紹介される。だが実際には、ごく少量ではあるものの、空気中の窒素（N）が入り込んだり、炭素が結晶中から抜け落ちた空孔（V）があったりと、結晶には様々な乱れ（欠陥）がある。なかでも、窒素と空孔が隣り合わせに存在する場合を特に「NVセンター」と呼ぶ。

NVセンターの基礎研究は2000年ごろから始まり、以下のことがわかってきた。NVセンターは量子状態を保持する電子スピンをもつ。スピンの量子状態は磁場、温度、圧力など周囲の環境のわずかな変化にも敏感に反応する。そして、量子状態の変化はNVセンターが発する蛍光（緑色のレーザー光をあてたときに発生する赤い蛍光、表紙写真参照）の発光強度の変化として読み取ることができる。つまり、



NVセンターをもつダイヤモンド結晶

左はCVD法で成長させたもの、右はHPHT法で成長した後電子線照射をしたもの。

NVセンターは環境変化のセンサーとして働き、しかも量子効果を用いるためにセンサー感度は非常に高い。さらに、量子状態の保持には低温冷却が必要な場合が一般的であるのに対し、NVセンターは、強固なダイヤモンド結晶で量子状態が守られているため常温で機能する。

加えて、NVセンターの量子状態を制御できることも明らかになったため、NVセンターを人工的につくって様々なセンサーに利用しようという研究が2010年ごろから一気にさかんになった。特に、磁気センサーとして用いられ、分子1個のみを分析可能な微小空間NMR（核磁気共鳴）装置や、磁気の方も計測可能な小型の心磁計や脳磁計ができると期待されており、寺地のチームもこの用途に向けたダイヤモンドの開発を目指している。

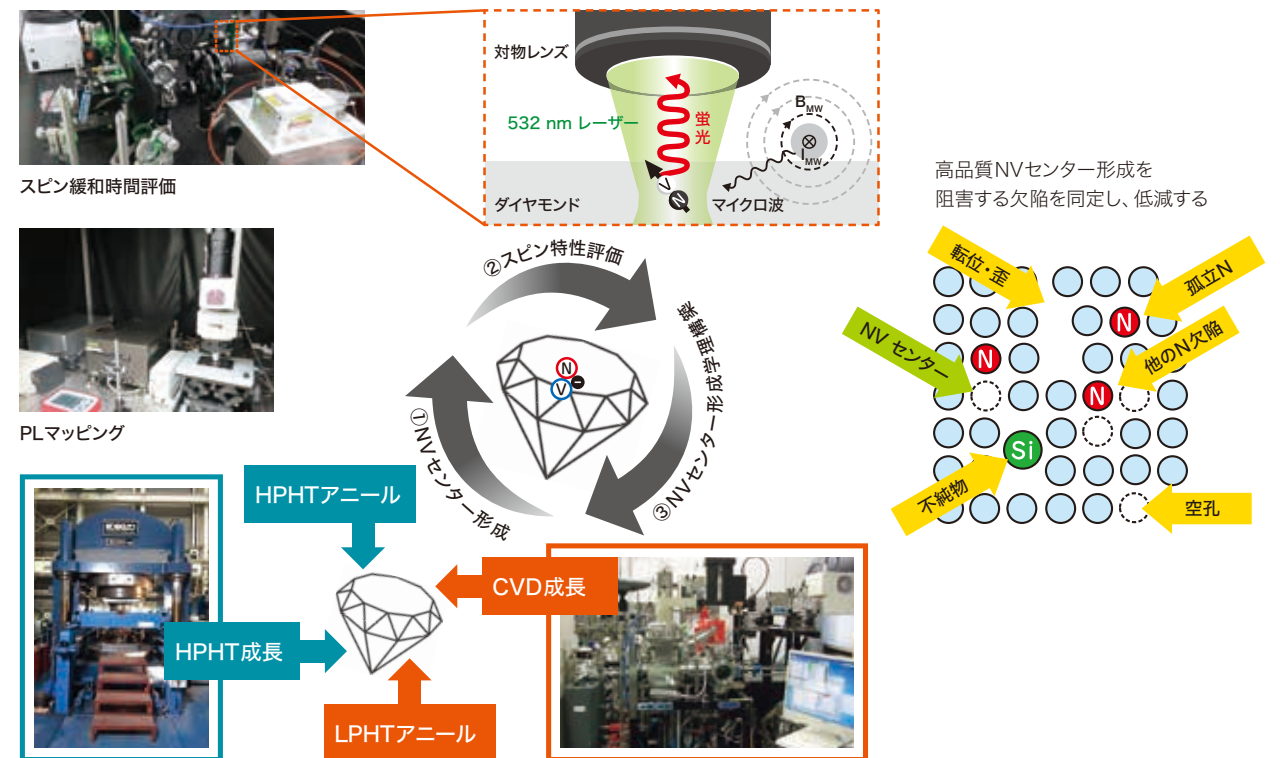
結晶成長と評価のサイクルを地道に繰り返す

「NVセンターをセンサーとして利用するには、センシング対象に応じたNVセンターの濃度や分布をダイヤモンド中につくこと、また長いスピン緩和時間（量子状態を保持できる時間）をもたせることが必要ですが、これらの特性を制御する大前提となるのが、高純度・高品質のダイヤモンド結晶をつくる技術と窒素を精密に制御してダイヤモンド中にドーピングする技術です」と寺地はいう。

ダイヤモンドの結晶を成長させる方法は2種類ある。金属溶媒に溶かした炭素を高温高压下で結晶として析出させる高压合成法（HPHT法）と、容器中に満たしたメタンガスを分解・反応させて基板上にダイヤモンド薄膜を積み上げる化学気相成長法（CVD法）だ。NIMSでは、MANA拠点長の谷口がHPHT法の高い技術を持ち、寺地は2015年にCVD法で世界最高純度のダイヤモンド成長に成功した実績がある。

チームではこの二つの結晶成長法でダイヤモンドをつくる際に原料に窒素を混入し、できた結晶に電子線を照射して空孔をつくることでNVセンターを形成している。「HPHT法とCVD法では、ダイヤモンド結晶の形や大きさだけでなく、窒素の入りやすさも異なります。そうした違いを利用したり、組み合わせて使ったりすることで、様々な特性のNVセンターをつくることができます」と寺地はNIMSの強みを語る。

こうしてNVセンターをもつダイヤモンドができたら、どんな特性をもっているかを評価する。NVセンターの濃度や分布を調べるにはフォトルミネッセンス（PL）マッピングという手法を使い、スピン緩和時間は、蛍光を発光しているときにマイクロ波をあてて評価する。これらの結果をダイヤモンド成長時の窒素の混入量や電子線照射の強さなどの条件にフィードバックすることで、目指す特性をもつNVセンターに近づこうとしているのだ。



チームが進める研究の全体像

NVセンター形成、特性評価、学理構築のサイクルを回すことで、目的の特性をもつNVセンターの形成を目指している。NVセンター形成のための電子線照射とスピン緩和時間評価装置の開発は量子科学技術研究開発機構の協力を得て実施。

高い要求性能に応えるために

しかし、高感度の磁気センサーに求められる性能を実現することは簡単ではない。磁気センサーの感度を上げるにはNVセンターの数を増やすことが不可欠だ。しかし、NVセンターをつくる際には、感度に寄与しない窒素欠陥（NVNやVNNNといったNとVが結合したもの）もできてしまい、NVセンターだけを選択的、かつ、高濃度につくる手法はまだ確立されていない。また、スピン緩和時間が長いことは、磁気センサー用途に限らず様々な量子デバイス応用において重要だが、NVセンターの数を増やそうとして窒素の濃度を上げると、スピン緩和時間が短くなってしまう。

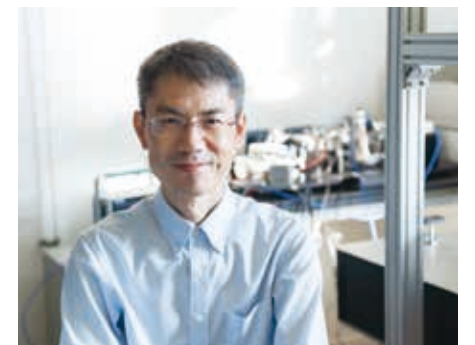
さらに、NVセンターに求められる条件は同じ磁気センサーでも用途によって異なる。心磁計や脳磁計には、遠くの微小な磁力変化を感知できるように、NVセンターの濃度が高くて結晶全体に均一に分

布し、スピン緩和時間が10マイクロ秒以上のダイヤモンドが必要だ。一方、微小空間NMRには、結晶の表面近傍（～100ナノメートル以下）にあるNVセンターのスピン緩和時間が100マイクロ秒程度で、NVセンターの濃度は低い結晶が求められる。ところが、表面付近のNVセンターはスピン緩和時間が短くなる傾向があるため、両立が難しい。表面近傍のNVセンターをいかに機能させるかは今後の課題だ。

「量子材料として材料側に求められる要求性能は半導体用のダイヤモンドよりもさらに高いのです」という寺地。研究チームには理論や計算を専門とする研究員も参加し、理論に裏付けられた成長法や結晶処理法の探索、また評価結果の考察を行っている。

「高い要求性能に対して、成長、計測・評価、理論の研究者が真摯に向き合えば、磁気センサー以外の応用からの要求性能を満たすことや、ダイヤモンドのNVセンター

より高性能なポストNVセンターの発見につながる手がかりを掴むことも可能になるはずです」。寺地らの力強い挑戦はダイヤモンドを超え、その先にまで続いている。（文・大石かおり）



寺地 徳之

Tokuyuki Teraji

機能性材料研究拠点 電気・電子機能分野
ワイドギャップ半導体グループ
主席研究員

NIMS独自の量子ドットで盗聴不可能な次世代の量子情報通信を目指す

盗聴不可能な次世代の情報通信技術として注目されている量子情報通信。近年は、量子コンピュータどうしをネットワークでつなぐための技術としても関心が高まっている。それに伴い、量子情報通信に不可欠な光子をつくるコア技術として、NIMSが独自に開発してきた量子ドットが注目されている。量子マテリアルプロジェクトの下、量子情報通信の実用化に向けて量子ドットの研究開発がますます加速している。

量子情報通信に不可欠な単一光子源を量子ドットで実現

“絶対に盗聴されない”安心・安全な次世代通信技術として、世界各国で量子情報通信の研究開発が進められている。量子情報通信は光子の量子状態を利用した光通信技術だ。既存の光通信も量子情報通信も、光ファイバーを使う点は同じだが、利用する光子の数が違う。既存の光通信ではレーザー光のパルスを使って情報を伝送しており、1ビットの情報に用いられる光子の数は10万～100万個に及ぶ。そのため、伝送中に光子の一部が盗み取られたとしても検知することが難しい。一方、量子情報通信では、1ビットの情報をたった1個の光子(単一光子)が担うため、伝送中に光子が盗み取られれば即座に検知できる。この性質を利用することで、盗聴される心配がない通信が可能となる。

しかし、実用化に向けては乗り越えるべきハードルがある。量子情報通信には、光子を厳密に1個ずつオンデマンドで発生させられる単一光子源が必要だが、まだその技術が確立されていないのだ。このため、現在の実証実験には、レーザー光をフィルターで減光し、個々のパルスに含まれる光子の数を大幅に減らした疑似的な単一光子源が使われている。こうした状況の下、黒田隆の率いるチームは、量子ドットを用いた単一光子源、さらには、後述の量子もつれ光子源の研究開発を進めている。

量子ドットで量子もつれを発生 長距離量子情報通信も可能に

量子ドットは、一辺の長さがわずか10ナノメートルほどの微小な半導体の結晶である。1個の量子ドットに1対の電子と正孔があると、1個の光子を発生させることができ

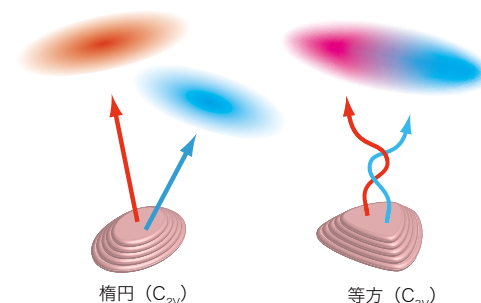
るため、単一光子源となりうる。

それだけでも量子ドットの有用性は高いが、さらに期待されるのが量子もつれ光子源への応用だ。実は、光ファイバーに送り込まれた光子の量子状態は壊れやすく、現在のところ、量子情報通信の伝送距離は数十キロメートルが限界となっている。そこで、伝送距離を延ばすために、2個の光子間の量子もつれを利用した中継技術が考案されている。その実現の鍵となるのが量子もつれ光子源だ。

量子ドットはなぜ量子もつれ光源となるのだろうか。「量子ドットに2対の電子と正孔があれば、2個の光子をほぼ同時に発生させることができるからです。量子ドットの対称性が十分高い場合、2個の光子は量子的にもつれた光子対になることが理論的に明らかになっています」と黒田は説明する。そのため、世界各国の研究者が対称性の高い量子ドットの形成を目指したが、なかなか実現できなかった。

このような中、2013年に光機能分野エピタキシャルナノ構造グループの間野高明が、NIMSで独自開発されてきた「液滴エピタキシー法」を用いて対称性の高い量子ドットの形成に成功。世界最高性能の量子もつれ光子対の発生を達成し、注目を集めた。

この成果を基に現在、黒田らは、量子ドットを量子情報通信に応用するための研究開発を進めている。特に注力しているのが、光子の波長をこれまでの0.7マイクロ



量子もつれ発生モード図

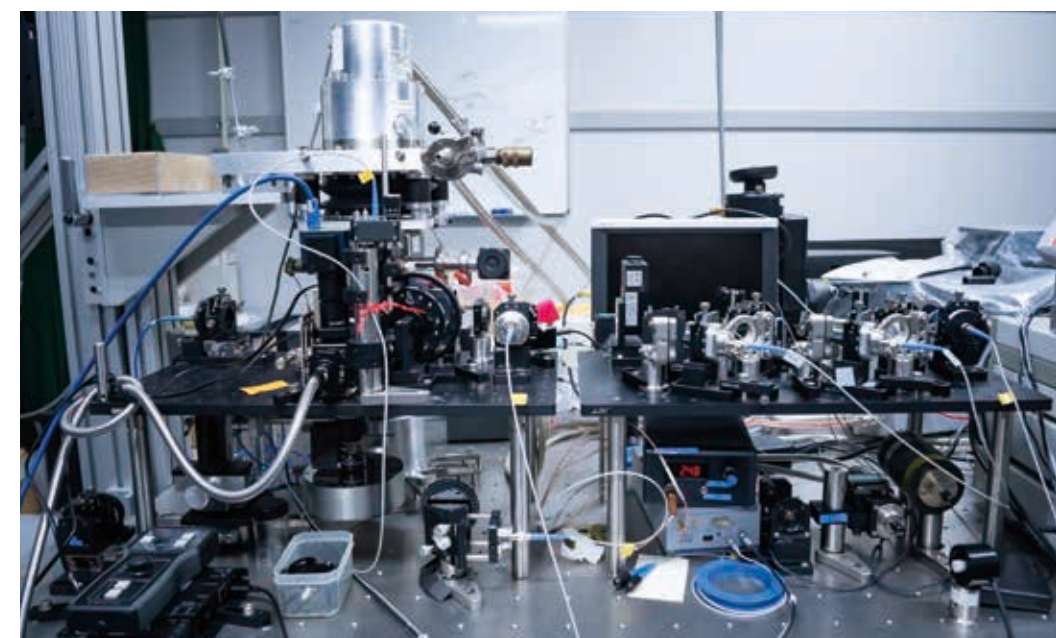
量子ドットの対称性が高いと、もつれ度の高い光子対が発生する。この図では左の楕円形の量子ドットより、右の三角形の量子ドットのほうが対称性が高く、もつれ度が高い。量子もつれの関係にある2個の光子では、一方の量子状態（偏光の向き）を観測すると、もう一方の量子状態が決まる。量子情報通信の中継では、この性質を利用して光子の量子状態を復元し、長距離の通信を可能にすることが考えられている。

メートルの可視域から1.55マイクロメートルの赤外域に拡大することだ。その理由は1.55マイクロメートルが長距離伝送用光ファイバーの最大透過帯だからだ。

「波長を赤外域に拡大するには、量子ドットの材料をガリウムヒ素（GaAs）からインジウムヒ素（InAs）に変える必要があります。実際InAsを用いた量子ドットを作製し、1.55マイクロメートルの単一光子の発生に成功しました。しかし、現状ではGaAsほど高い対称性を実現できていないため、最適な成長条件を探るべく試行錯誤を重ねているところです。また、赤外光の量子もつれを評価するための装置も新たに開発中です」と黒田は語る。

動作温度を上げることで省エネ化やモバイル化も実現

黒田のチームは、動作温度の向上にも取り組んでいる。量子ドットの中に閉じ込められている電子は、温度が上がると外に出ていってしまう。現在、電子を閉じ込めるには10ケルビン（-263.15℃）という極低温が必要だ。そのため、液体ヘリウムを使った大掛かりな冷却装置が不可欠で、環境への負



赤外光用量子もつれ評価装置

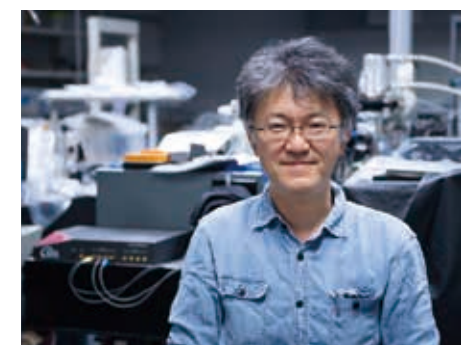
量子ドットから発する光を、効率よく光ファイバーに結合し、ファイバー内を伝搬する光子の量子特性を計測する。

荷も大きい。それに対し、黒田らは80ケルビン（-193.15℃）でも電子を十分閉じ込めることができる量子ドットの開発を目指している。80ケルビンであれば液体窒素での冷却が可能となるため、冷却装置を小型化でき、持ち運びもできるようになる。それにより、光ケーブルを使わない量子Wi-Fiによる秘匿性の高い移動体通信への応用も期待できる。

「電子をより高温で閉じ込めることができるようにするには、量子ドットと基板の間で、バンドギャップと呼ばれる障壁を大きくする必要があります。そうすれば、電子がバンドギャップを乗り越えることができず、量子ドットの中から逃げにくくなるからです。ところが、バンドギャップを大きくすると、量子ドットと基板の格子定数の差が大きくなるため、対称性の高い量子ドットを形成しにくくなるというジレンマに陥ります。現在、こちらに関しても、材料にInAsを使うことで、動作温度が高く対称性の高い量子ドットを形成するための最適条件を探っているところです。最適条件が見つければ、赤外域への波長の拡大と動作温度の向上を同時に実現できるものと期待しています」と黒田は語る。

量子コンピュータを実現する上でも不可欠な量子情報通信。黒田らはNIMS独自の量子ドットを用いた量子情報通信の実現に向け、今後も研究開発を加速させていく。

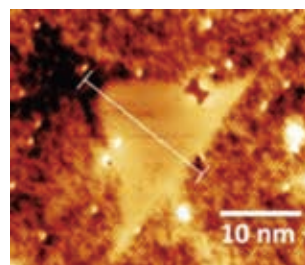
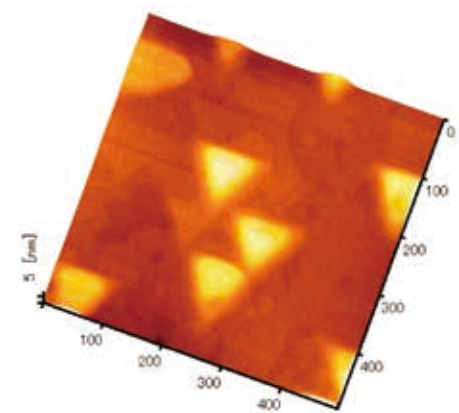
（文・山田久美）



黒田 隆

Takashi Kuroda

機能性材料研究拠点 光機能分野
ナノフォトニクスグループ
グループリーダー



GaAs量子ドットとその断面

液滴エピタキシー法により、GaAsの基板の上にナノメートルサイズの半球状のGaの液滴を形成させ、そこにAsを供給して結晶化させることで形成した。液滴エピタキシー法は様々な半導体に適用でき、高性能な量子ドットを形成できるため、EUでも大規模な研究プロジェクトが進行中だ。

謎多き二次元材料 六方晶窒化ホウ素のポテンシャルを探る

量子技術には、おもに電子を媒介とするものと光子を媒介とするものがある。量子情報通信など光子を媒介とする技術には、光子を効率よく発生する単一光子源が欠かせない(p12参照)。その材料の候補の一つとして注目されているのが六方晶窒化ホウ素だ。長年、六方晶窒化ホウ素の結晶成長に携わり、その性質に詳しい渡邊賢司に、六方晶窒化ホウ素の材料としての魅力と量子マテリアルプロジェクトにおける今後の研究方針を聞いた。

暮らしの中の六方晶窒化ホウ素

六方晶窒化ホウ素 (hexagonal BN、*h*-BN) は、ホウ素(B)と窒素(N)がハニカム状につながってシートを形成し、このシートが層状に積み重なった構造をとっている。「六方晶窒化ホウ素なんて聞いたことがないかもしれませんが、意外に身近に使われています」と渡邊。粉体状の*h*-BNは、身近なところでは鍵穴専用潤滑スプレーの主成分や、ファンデーションのフィット感をよくする滑沢剤として配合されている。また、熱的・化学的に安定なため、実験用の高温反応容器の材料にもなる。

渡邊は化学気相成長法 (CVD法) で、NIMS内で長年共同研究する谷口は高压合成法 (HPHT法) で、*h*-BNの結晶を成長させる。どちらでつくった結晶も、上記用途のものに比べて純度が高く表面もきれい。特にHPHT法の結晶は、量子マテリアルとして研究が進むグラフェンの基板として世界中で用いられ、多くの研究成果を支えている。渡邊がこの*h*-BN自体に量子マテリアルとしての素質を見いだしたのは、2004年のことだった。

窒化ホウ素は、Ⅲ族元素のホウ素とⅤ族元素の窒素からなるⅢ-Ⅴ族半導体だ。この半導体の仲間には、青色LEDで知られる窒化ガリウム (GaN) など強く発光するものも多い。一方、閃亜鉛鉱型の窒化ホウ素 (cubic BN、*c*-BN) は、高性能な半導体材料として期待されるダイヤモンドと同じよ

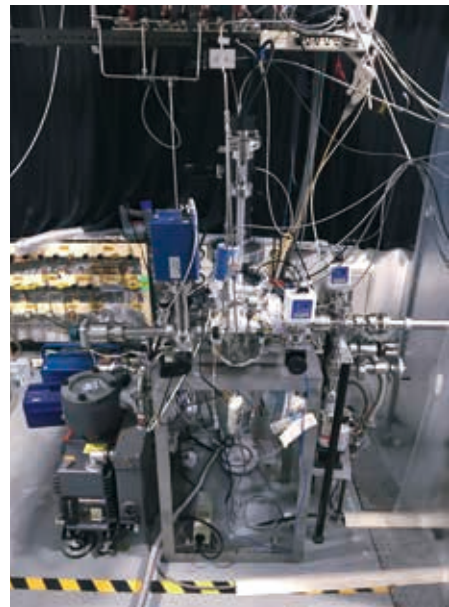
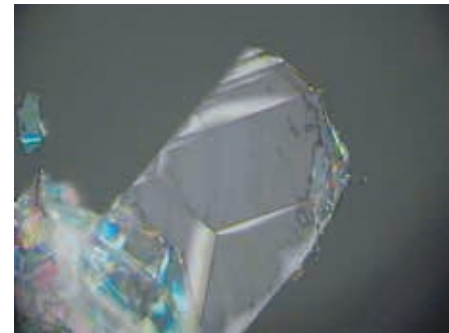
うな性質をもつことから注目されてきた。ところが、結晶成長の際にどうしても不純物を取り込みやすいという問題がある。「純度を上げないと、その物質固有の性質を知ることができません。そこで私たちは、*c*-BNの高純度化に取り組んでいましたが、ある日、その副産物で結晶構造が異なる*h*-BNの高い透明度に気がつきました。そして電子線を照射したところ、波長215ナノメートルの遠紫外領域に強い発光を発見したのです」と渡邊。この発光現象を利用して、乾電池でも動作する殺菌用の紫外線発光デバイスが開発された。さらに、この発見の大きなインパクトは、「高純度*h*-BN結晶がよく光る材料」とわかり、量子マテリアルとしての可能性が示されたことだった。

高い発光効率の謎に迫る

光子を使った量子通信技術の実現には、光子を1個ずつ発生させる単一光子源が必須であり、様々な材料・方式が研究されている(p12も参照)。

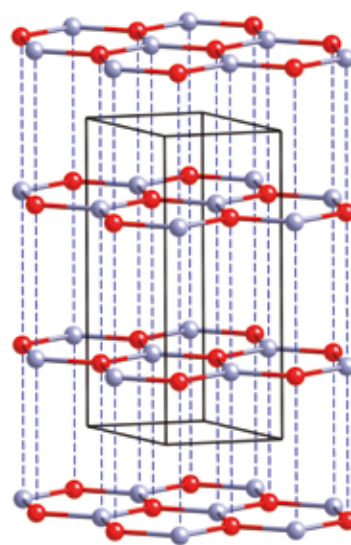
「*h*-BNを使えば光子を効率よく発生する単一光子源を開発できると期待されますが、その前にまず、強い遠紫外発光の“謎”を解明します」と渡邊は今後の研究方針を話す。半導体では、励起された電子と、その電子がもともとあったエネルギー準位に空いたホール (正孔) が再結合する際に発光が起こる。励起電子とホールの関係には直接遷移型と間接遷移型の2種類があ

る。間接遷移型では励起電子とホールが再結合するのに格子振動の助けが必要なため、その必要がない直接遷移型よりも一般に発光効率が低い。しかし、*h*-BNは理論・実験の両面から間接遷移型であることが示されているが、非常に高い発光効率を

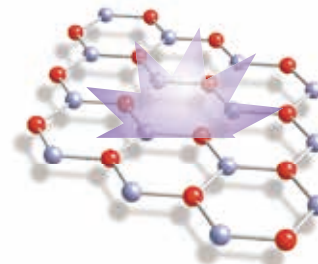


六方晶窒化ホウ素 (*h*-BN) の薄膜結晶とこの結晶を成長させたCVD装置

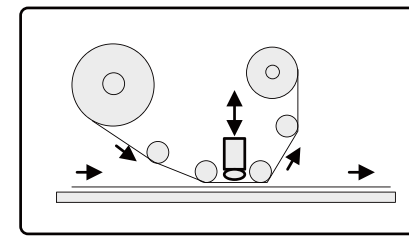
二次元材料の利点を生かせる
●発光効率
●素子への組み込み
●被検物質との距離を制御できる



光学的活性層の取り出し



●どこにでも貼り付けられる
●貼り付け精度は高いので位置の制御が可能
●無害



スタンプによる六方晶窒化ホウ素活性層の転写

量子センサーや
光量子コンピュータ：
スタンプ法による大量生産

h-BNの量子マテリアルとしての展開

h-BNはシートが積み重なった構造をとっており(左)、数層ずつはがすことができる。発光する欠陥をもつ層(光学的活性層)を取り出して、ほかの材料に転写することにより、様々な素子を量産することも可能だ。

示す。ここに謎があるという。

「おそらく、BとNのシート状構造による“二次元閉じ込め効果”と、励起電子とホール間にクーロン力が働いてまるで一つの分子のように振る舞う“エキシトン効果”、さらには、結晶が変形しやすく励起電子が影響を受けやすいことによって再結合の効率が上がっているのだと思います」

新たな実験と過去の研究データを基に欠陥発光を探る

ただし、*h*-BNの強い遠紫外発光を直接単一光子源に利用するわけではない。「*h*-BNに電子線を照射したり、結晶成長の際に不純物を加えたりして結晶内に欠陥をつくと、この欠陥から発光が起こります。*h*-BNはもともと発光効率が高いので、欠陥も高効率で発光する可能性が高い。この欠陥由来の発光を単一光子源として利用したいのです」と渡邊はいう。単一光子源として利用するには、発光は磁界・電界・圧力などで制御でき、再現性も高い必要がある。さらに、波長は光ファイバーの吸

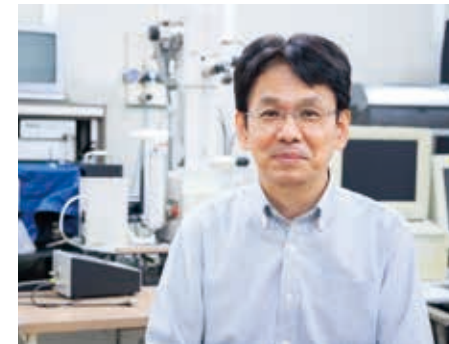
収が最も少ない1.55マイクロメートル付近が理想だ。こうした欠陥発光を得るために、どのぐらいの強度の電子線を照射するのか、不純物として何をどのぐらい加えるのかなど、これからの実験で検討すべき事項は山積みだ。上で述べた、欠陥をつくる前の*h*-BNの発光機構の解明は、こうした検討を行うときの重要なヒントとなる。

欠陥からの発光についてはダイヤモンドなどの研究が先行している中で、*h*-BNを研究する意味は何だろうか。渡邊は、「*h*-BNは数層ずつはがすことができ、はがしたものは二次元材料となるので、どこにでも簡単に貼り付けられる。欠陥のある層だけを抜き出してスタンプのようにほかの材料に貼り付ければ、素子の量産も可能です」と、*h*-BNが二次元材料であることの利点を強調する。

「現状、どんな欠陥発光が得られるかはまったくの未知数です。しかしNIMSには前身の無機材質研究所時代からの*h*-BNの研究データが蓄積されています。その中から欠陥に関する情報を拾い上げつつ、理論グループと力を合わせて、量子マテリ

アルとしての可能性を探っていきます」。これまでの地道な研究を背景に、NIMSが世界の*h*-BN研究をリードするのは間違いなさそうだ。

(文・池田亜希子)



渡邊 賢司

Kenji Watanabe

機能性材料研究拠点 電気・電子機能分野
電子セラミックスグループ
主席研究員

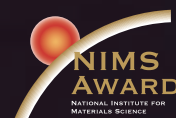
2021 NIMS Award 授賞式・学術シンポジウム

ナノマテリアルの革新的量子機能

2021年11月17日(水) 10:00 ~ 16:35

オンライン開催 (Zoom) 使用言語: 英語 (同時通訳なし)

■ NIMS Award受賞記念講演



安藤 恒也 氏 東京工業大学 栄誉・名誉教授 / 東京大学 名誉教授

“グラフェンの物理”
“Physics of Graphene”



Allan H. MacDonald 氏 テキサス大学オースティン校 教授

“モアレ材料のマジック”
“The Magic of Moiré Materials”



Pablo Jarillo-Herrero 氏 マサチューセッツ工科大学 教授

“モアレ量子物質最前線”
“The Moiré Quantum Matter Frontier”

■ 学術シンポジウム 招待講演

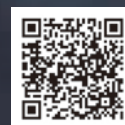
水田 博 教授 北陸先端科学技術大学院大学

“グラフェンナノ電子機械デバイス技術による
極限センシングとナノスケール熱制御”

村上 修一 教授 東京工業大学

“トポロジカル物質の新地平”

参加登録はこちら: <https://www.nims.go.jp/nimsweek/index.html>
お問い合わせ: NIMS WEEK 2021事務局<nimsweek@nims.go.jp>



NIMS NOW vol.21 No.4 通巻189号 2021年11月発行

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

〒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

定期購読のお申し込みは、上記FAX、またはE-mailにて承っております。 禁無断転載 © 2021 All rights reserved by the National Institute for Materials Science

表紙写真: ダイヤモンドNVセンターからの蛍光 撮影: 石川典人 デザイン: Barbazio株式会社

R270

古紙配合率 70% 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