Interview

光量子コンピューターで開発競争に挑む
—光の特性が混戦を制する！

東京大学
武田俊太郎

◆武田　俊太郎（タケダ　シュンタロウ）
東京大学　大学院工学系研究科　准教授

2014年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（工学）。2014年～2017年分子科学研究所特任助教および助教。2017年から東京大学大学院工学系研究科助教および特任講師を経て，2019年より現職。これまで光を用いたさまざまな量子技術の研究に関わっており，現在は独自方式の光量子コンピュータ開発に取り組んでいる。主な著書に，「量子コンピュータが本当にわかる！」（技術評論社，2020年），「新版 量子光学と量子情報科学」（サイエンス社，2020年）など。

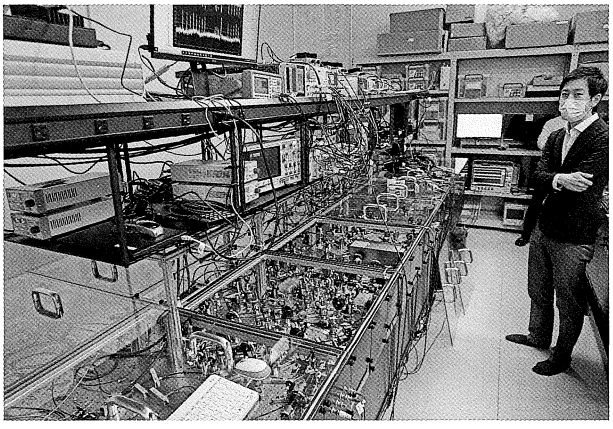
「万能コンピューター」として過大な期待が寄せられ，研究者も当惑するようなフィーバーとなった量子コンピューターだが，最近は徐々に落ち着きを見せており，いよいよその研究は「地に足のついた」フェーズに入ってきたように見える。

多様な方式が提案される中，我々が注目するのはもちろん光を用いた「光量子コンピューター」だ。そこで今回，光量子コンピューター研究のホープである東京大学准教授の武田俊太郎氏に話を伺った。ここでは難解な理論よりも，研究現場で組まれている光学系などに重点を置いてその概要を紹介する。激しさを増すレースを制するのは誰か？その未来に期待したい。

—先生のご研究を紹介してください

量子コンピューターは経済や安全保障などにも関わるため，世界各国で活発に開発が行なわれていています。いろいろある方式の中で一番メジャーなのは超伝導回路を使う方式で，研究も一番進んでいます。例えばgoogleやIBMといった大手のIT企業や，日本では東京大学でも研究しています。超伝導は確かに一番進んでいるポピュラーな方式ですが，現状は小規模で計算ミスも多く，量子コンピューターの実現という遠いゴールを考えるとまだ1～2合目といった段階で，他の方式にも十分チャンスがある状況です。

私はその中で光の量子コンピューターを研究していますが，それは光量子コンピューターが実現するとオールマイティな量子コンピューターとなる期待があるからです。オールマイティと言える理由はいくつかあります。まず一つ目は，超伝導など他の量子コンピューターの方式は，冷凍機や真空装置を使って特殊な環境にしないと動きませんが，光量子コンピューターは私たちが暮らし



研究室は温度を一定に保つと共に，定盤には風の影響を防ぐためのアクリル製のカバーが被せられている

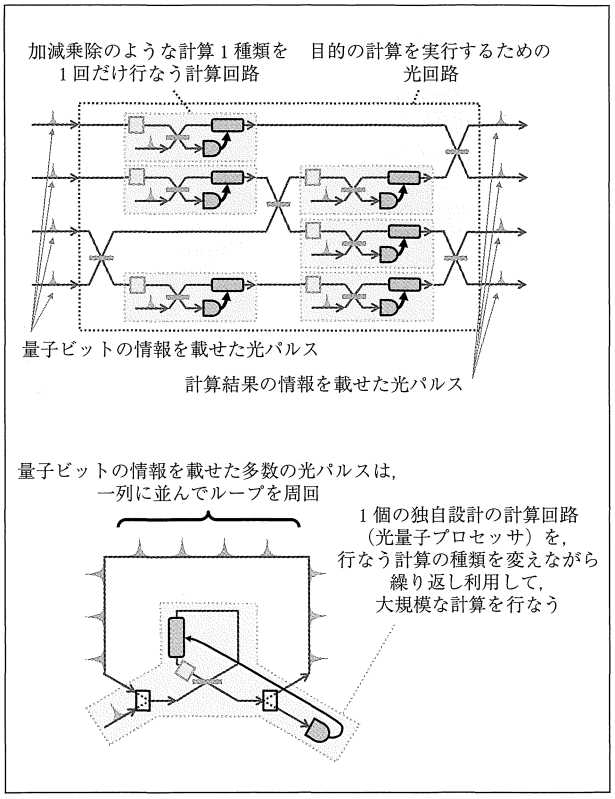
ている室温大気中で動きます。物理的な制約がないので，小規模でも良く動くマシンができたら，それをどんどん拡張して大規模化できると期待しています。

また，光は空間で情報を移動する唯一の量子なので，光量子コンピューターは，量子インターネットや量子通信といった未来の通信にも簡単に接続できます。もちろん光はとても周波数が高く，帯域も広いので，たくさんの情報を高速に処理できます。高クロック周波数で動く光量子コンピューターが期待できるというのも一つ重要な点です。

光量子コンピューターは世界的に見るとマイナーな研究領域でプレイヤーの数も多くないのですが，日本は光の量子分野に強い技術を持っていますし，光通信や光ファイバー関係などの光の技術にも強いので，量子コンピューターも日本に勝ち目がある分野なのではないかと期待しています。こうして私は光量子コンピューターに着目し，オリジナルの方式を考案して独自に開発する研究をしています。

―先生の光量子コンピューターにはどんな特徴がありますか？

光量子コンピューターにはいくつかの方法があって，伝統的な光量子コンピューターは光子が主役です。光子を一粒準備して，その偏光，電場の振動方向を使うというのが一番やりやすい方法です。縦に振動していれば0，横に振動してれば1，のように決めてあげると，その光

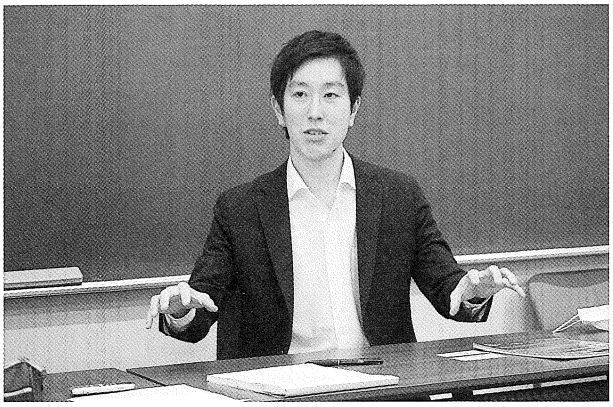


従来の光量子コンピューターのアプローチ（上）と，武田研究室が開発したループ型のアプローチ（下）

子１個の振動の向き，偏光の状態で，0と1の重ね合わせを表せます。それを光回路で走らせて計算をします。

私達の方式はちょっと違っていて，光の粒ではなくて，光の波の性質に情報を載せようとしています。光は粒としての側面と同時に波としての性質も持っています。波は振幅や位相といった連続的に値を持つ物理的な量を持っていますので，そういうアナログ的な光の性質に，量子の情報を埋め込んで処理をするというアプローチです。例えば波の振幅はマイナス無限からプラス無限まで連続的な値がとれますが，そこにしきい値を決めて，ここからこの範囲だったら0，ここからこの範囲だったら1というように決めるやり方です。実はこのしきい値でデジタル化するという方法はノイズに強く，高効率に計算処理ができたり，計算の途中でエラーが起きても，それを効率良く直す優れた方法も発見されたりしている点も魅力です。

もう一つの特徴は，ループの光回路を使っていること



です。典型的な光量子コンピューターは光の量子ビットをたくさん並列に用意して同時に走らせますが，我々はループ構造の中に光を時間的にずらしてたくさん蓄え，その中をぐるぐると回しながら，1個の演算装置を繰り返し使って計算をする，ループ型の光量子コンピューターという構造を発見しました。これを使って計算しようというのが二つ目の重要な特徴です。

―アプリケーション寄りの研究もされているそうですが，いち早く市場で使っていきたいということでしょうか？

そうです。量子コンピューターの実現を山登りに例えると，10合目，つまり頂上まで行かないと社会の役に立ちません。9合目でも，やっぱりまだスパコンの方が速いねっていうことになるからです。もちろん研究自体は楽しみながらやればいいのですが，そこには予算も必要です。研究を理解していただき，長い投資をしてもらうためには，今いる1～2合目から10合目まで世の中で何の役にも立たずに登っていくのは難しいと思います。光の量子技術は量子コンピューター以外にも，量子通信や量子センサーなどにも応用できるので，そういうところを山登りの途中のチェックポイントとして究極のゴール，量子コンピューターを目指すのもありかなと思っています。

―実用化が近いアプリケーションは何でしょうか？

光の量子技術の中で商用化に近いのは量子暗号です。量子暗号は光子1個レベルの光で盗聴不能で安全な通信を実現する技術ですが，すでに製品もあって商用化に近い位置まで来ています。その次は量子センサーです。数年前に重力波の観測がノーベル賞を取りましたが，重力波は一辺数kmの巨大な干渉計を用いて空間のゆがみを光で捉えることで検出されています。このような重力波のセンサーでは，スクイーズド光と呼ばれる量子の性質を制御した光を使うことで，より高い精度や感度が実現されています。これはある意味，量子センサーが実用化されていることを意味しています。もちろん身近に使える量子センサーはまだまだですが，量子コンピューターよりは圧倒的に必要な要素が限られているので，実用化に近い分野と言えると思います。

―なぜ超伝導方式が量子コンピューターの研究をリードしているのでしょうか？

量子コンピューターに使う量子は自然界にあるものを使うことが多く，私の場合は光子を使いますし，原子を使う量子コンピューターもあります。これらの量子は人間が作ったものではなく，ある意味神が与えた量子ビットと言えます。一方，超伝導の量子ビットは人工物なので，作った量子ビットに欠点があると思ったら，電気回路の設計を変えることで克服できたりします。量子の性質自体を人間が設計できるということがすごく大きなメリットです。光子や原子や電子の場合は，人間がその性質を変えたりすることはできないので，その性質は受け入れたうえで，それでも適切に制御できるよう量子コンピューターを設計しなくてはいけません。

―超伝導方式に対する光のメリットとデメリットは何でしょうか？

まず，光は室温大気中で量子の性質を保つことができます。温度がある環境では熱雑音がありますが，私たちが暮らす20℃位の室温が持つ熱ノイズよりも光子1個のエネルギーの方が桁違いに大きいので，光子からするとほぼノイズの無いクリーンな環境に見えます。一方，超伝導では量子ビット1個分のエネルギーが小さく，室温環境だとノイズに埋もれてしまうので，周囲を冷やして周りに雑音がないクリーンな環境にする必要があります。

それと，光子は空間を光の速度で進んでいくのに対し，超伝導の一か所にずっととどまっている性質は，量子コ

ンピューターの作り方にも影響します。超伝導の量子コンピューターは量子ビットが一か所にあって，そこに外から指令を送って計算をさせますが，光はずっと動いているので，その通り道に沿って部品を置くことで計算をしていきます。光は動くからこそ通信にも使えますし，量子通信や量子インターネットといった分野は必ず光子が主役です。

一方で，光子は相互作用，より厳密に言うと非線形の相互作用が苦手です。基本的に光子と光子が空間でぶつかっても，お互い何も影響も及ぼさずに素通りしてしまう。お互いにあまり影響しないという意味でエラーが起こりにくいとも言えますが，量子コンピューターでは，二つの光子にうまく相互作用してもらい連携プレーで計算をする必要もあります。光の粒の性質を使う伝統的な光量子コンピューターだと，この相互作用を効率よく引き起こすのは至難の業ですが，振幅と位相という連続的な自由度を使った私達の方式では，相互作用に相当するものも結構簡単に実装できる方法が最近見つかっていますので，これから試していく段階です。

これに対して超伝導の場合，チップ上に量子ビットの回路パターンを置いて，その間を線で繋ぐことで相互作用をコントロールすることができます。量子ビット間に簡単に相互作用を引き起こして，2個の量子ビットの間で連携プレーのような計算がやりやすいと言えます。

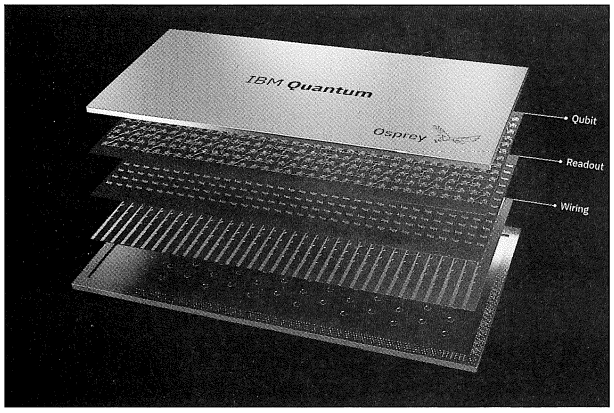
ただ，光量子コンピューターは実現できればオールマイティになるという点と，先ほどのようにセンサーや通信といったアプリケーションが多いので，万一量子コンピューター競争で負けても，培った技術はそういったところで必ず使われます。そういう意味では光量子コンピューターはやりがいがある分野だと考えています。

—よく比較されるビット数はどうでしょうか？

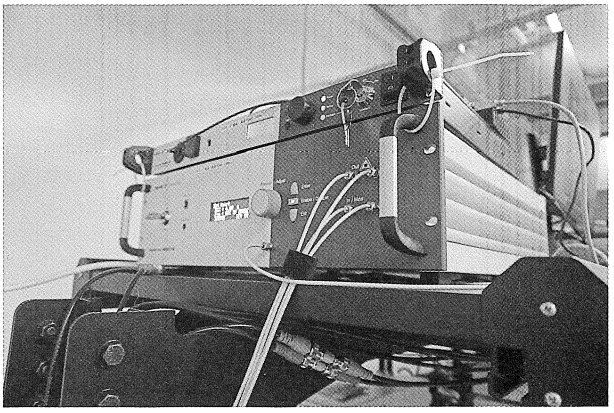
超伝導の最先端はIBMで433量子ビットのマシンを発表しています。光は短いパルス1個が量子ビット1個となりますが，私たちがやっている方式は現状のプロトタイプだと最大で3量子ビット相当しか扱えませんので，ビット数では全然かなっていません。ただ，我々の方式はループを大きくしていくだけで中の光のパルスの数が増やせるので，量子ビットの数は増やしやすい方式だと思っています。例えば現状のプロトタイプマシンだと，パルスの間隔は66ナノ秒です。その間に光は20 mぐらい進むので，ループの長さは20 m×量子ビット数，つまりパルスの数になります。単純に考えると，例えば1 km位の光ファイバーのループなら50～100個ぐらいのパルスが収まります。ただ，光ファイバーにも長さに応じたロスがあり，光子の量子ビットは途中でロスを受けて無くなると情報が壊れて直せないので，実際には光ファイバーの長さにも制約があります。そこで，光ファイバーを長くする代わりに，66ナノ秒というパルスの間隔を一桁二桁縮めてパルス数を増やせる可能性は充分にあります。

—光源にはどんなレーザーを使っていますか？

波長1545 nmのCWファイバーレーザーです。レーザー自体が持っている位相や振幅のノイズが影響を及ぼす



433量子ビットプロセッサ「IBM Osprey」（出典：IBM HP）



光源となるNKTフォトニクスのファイバーレーザー

ので，そうしたノイズができるだけ小さいものを選んでいます。具体的には，浜松ホトニクスが買収したデンマークのNKTフォトニクスのレーザーを使っています。この波長で量子の光の実験をする人たちはこのレーザーを使っている人が多いですね。今作ろうとしているマシンは通信波長の1545 nmを使っていますが，1つ前のプロトタイプでは860 nmでした。この波長帯は昔から光子1個が高効率に測れる半導体の光子検出器が結構簡単に入手できたからです。一方，通信波長帯まで波長が長くなると，光子1個のエネルギーがどんどん小さくなって半導体の検出器はもちろん，他に測る技術もありませんでした。しかし，最近は超伝導光子検出器によって，1.5 μm付近の光子であっても非常にいい効率で測れるようになりました。通信波長帯はファイバーとの相性も良いので，今は1545 nmを使っています。

―検出器が超伝導ということは冷凍機が必要ですね

確かにそこの部分だけは必要です。超伝導量子コンピューターだと数10ミリケルビンまで冷やす必要があるので，希釈冷凍機という馬鹿でかいドラム缶みたいな装置を使うんですが，私たちが使っている超伝導光子検出器は数ケルビンぐらい冷えれば動作するので，装置自体はそんなに大きくありません。しかも冷凍機に入れるのは検出器の部分だけで，実際に計算を行なうメインの部分はすべて室温大気中にあるので大きな負担ではありません。

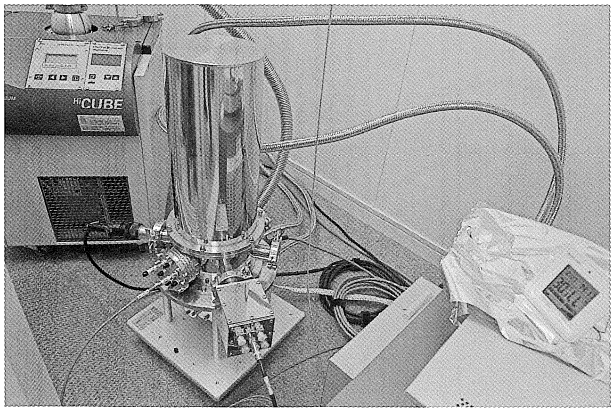
超伝導の量子コンピューターの場合は冷凍機の中にメインのチップがあって，そのチップを制御するためにいろんな配線をしないといけません。その配線が室温にあるデバイスと繋がっているので，その大量の配線を繋げるのがすごく大変で，ネックになっています。なので，冷やさないといけないという制約はそういう意味でもすごく重いと感じています。

―レーザーからどのように単一光子を作り出すのでしょうか？

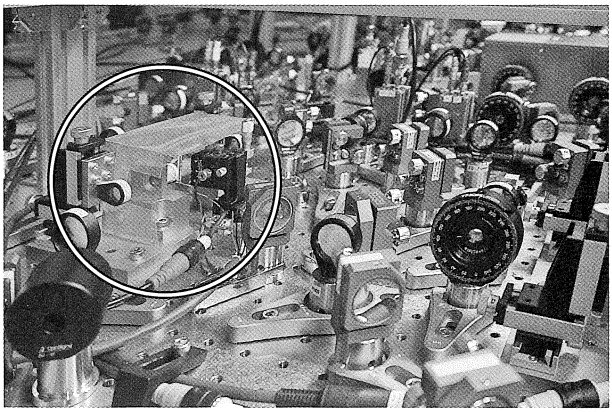
レーザーから光子1個を作るには，PPKTPという非線形光学結晶を使っています。二次の非線形光学効果を持つ結晶で，PPは周期分極反転構造です。最終的に1545 nmの量子的な光，スクイーズド光を作るのですが，そのために二次の非線形光学効果を使います。ポンプ光として半分の波長の772.5 nmの光を入れてあげると周波数が半分，波長が二倍になる形でスクイーズド光が作られ，ここから量子の世界が始まります。もう少し正確に言うと，この結晶はシングルパスだと充分な変換効率が出ないので，三枚のミラーで囲んで三角形型の共振器にすることで変換効率を上げています。一光子を作ったり，量子もつれを作ったりできるスクイーズド光は，量子研究において主役級の光です。

―どんな光学素子でシステムを組んでいますか？

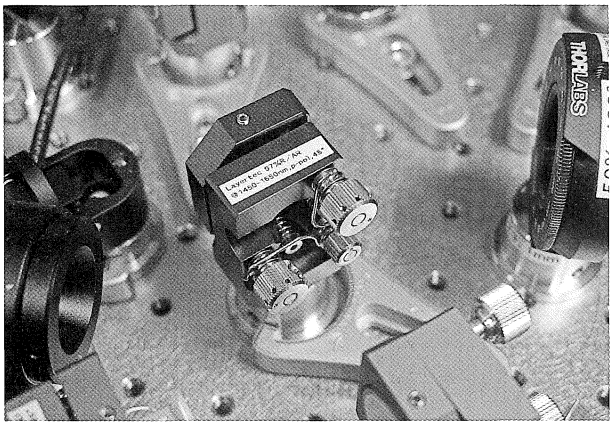
定盤は4.2 m×1.5 mのサイズで，振動を避けるために空気浮上式のものを使っています。室温は常に23℃くらいに保っていて，普段は空気の揺れを防ぐために，宝石



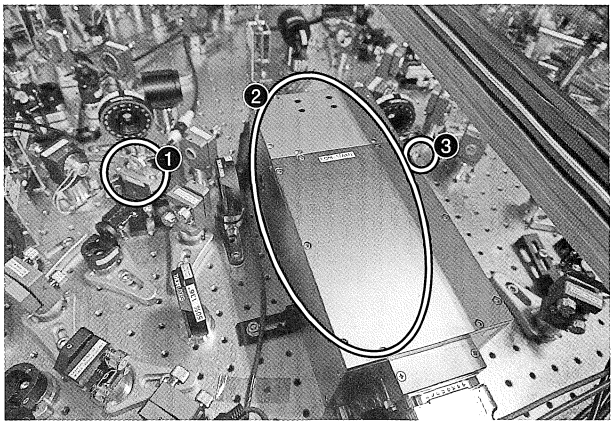
超伝導光子検出器を冷却する冷凍機



PPKTPと3枚のミラーからなる量子光源



LAYERTECのミラーの固定には安定性に定評があるファーストメカニカルデザイン（FMD）のマウントを使用



①，③の偏光ビームスプリッタと②のEOMで66 ナノ秒ごとに透過率を変えられる可変ビームスプリッタとして機能する

店のショーケースみたいに周囲に風防を付けていて，調整やデータをとるときだけ外します。ミラーなどは99.9％以上反射するコーティングのものをドイツのLAYERTECに特注で作ってもらっていますが，それでもやはり0.1％ぐらいはロスがあります。ただ現状だとミラーよりも透過型の部品，例えばレンズやEOM（電気光学変調器）といった部品のロスの方が大きいですね。1か所あたり高くてせいぜい1％ぐらいのロスでも，システムのトータルで蓄積してしまい，現状では量子の世界のスタートから最後に測定するまでに10％ぐらいはロスがある感じです。

できる限り設計を工夫してロスを減らしていますが，ちゃんと動く光量子コンピューターを作るとき，空間中にミラーを置いていくようなスタイルでは限界が目に見えています。将来的には空間中に光を飛ばさない，可能な限り低損失で繋げたファイバーのシステムとして作るとか，光導波路のチップにする研究も盛んにされていますので，その方がトータルの損失を減らせる可能性があると思います。

―ループ型の実現に特に必要な技術はありますか？

ループ型の量子コンピューターは，足し算をして66ナノ秒後に次のパルスが来たら今度は掛け算というように，演算のタイプをパルスごとに切り替える必要があります。そのためにビームスプリッターの透過率や光の位相を瞬時に切り替えて，かつそれを低損失に行なう機構を開発しました。縦偏光と横偏光の二つの光を，偏光ビームスプリッターで一つの軸に乗せ，それをEOMに通して電圧をかけると偏光を回転できます。縦横の偏光が同軸に乗った後に偏光を回してもう一回縦横で分離すると，二つの光が混ざって出てくるので，EOMの電圧を66ナノ秒ごとに切り替えれば，ある意味透過率に相当する値を2％ぐらいのロスで変えられます。私のループ方式は時間的に切り替えるのがポイントなので，この仕組みによって低損失に66ナノ秒ごとにいろんな計算が時々刻々と処理できることが大きな技術ポイントになっています。

―次のステップは何でしょうか？

私の光量子コンピューターは，最近シンプルなプロトタイプで簡単なデモ実験ができたという段階です。簡単な計算はできますが，ロスの問題から複雑な計算は難しいというのが現状です。その損失やエラーを減らすのはもちろんですが，それも限界があるので，効率よくエラーが直せるようなエラー訂正の仕方を見つけるのも重要な課題です。

―実験装置などに注文はありますか？

内閣府のホームページに「量子技術イノベーション戦略ロードマップ」というものがあります※。いろんな量

※ https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/roadmap_220422.pdf

子コンピューターの今後何10年のロードマップに，こういう技術が必要で，これぐらいの段階でこういうものを作りたいというのが載っています。その光量子コンピューターのロードマップは私が作っていて，そこに今後必要になる物も書いています。量子コンピューターは低損失である必要があるので，そうした結晶や，光導波路回路，スイッチ，変調器，さらに光子検出器や光子数識別器といった検出器も必要です。色々な企業さんから今後何が必要かとよく聞かれるので，是非それを見てください。

実験室にNTTが作ったデバイスがあるのですが，そのデバイスは導波路型の結晶で，シングルパスでスクイーズド光が出てきます。それがすごく優秀で，今までよりスクイーズド光を簡単に作れますし，光量子コンピューターの処理の高速性にも貢献しています。置き換えていくだけで光量子コンピューターの性能がどんどんアップデートされていくようなものなので，光が強いメーカーさんも要素技術などで使えそうなものがあれば，ご検討いただけるとうれしいと思います。

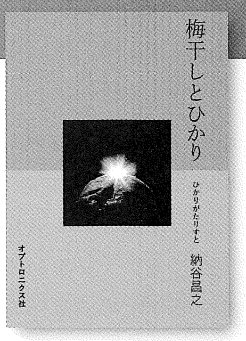
―海外の研究が先行する印象もありますが日本の現状をどう捉えていますか？

確かに主流の超伝導方式では米国や中国などが先行していますが，勝負はまだ全く決まっていません。日本は量子コンピューターのいくつかの代表的な方式において世界トップクラスの研究者がそろっており，同時並行で様々な方式の研究を進めていますので，十分にチャンスがあります。ただ，現状は人材の面で問題があると思っています。いろんな量子分野の研究室や先生に大きな予算がついて，新しい人を雇ってどんどん研究を進めたいのに，人がいなくて奪い合いになっています。逆に量子分野の若手から見ると，そういった中間的で任期付きの研究ポストはたくさんあるものの，最終目標として見据える任期のない魅力的な研究ポストは大学や研究所に劇的に増える状況にはありません。量子の研究に興味があってもキャリアパスを描きにくいので，別の分野に行ってしまう人もいます。実際，量子分野の若手研究者には優秀で成果をあげている方も多いのに，いろんな大学や研究所を任期付きの身分で渡り歩くことをずっと繰り返していて，なかなか任期の無い身分になれないのは厳しい状況ですね。量子分野の優秀な人材を活かすとともに，次世代の人材を育てていくために，大学にもっと量子に関するポストや研究室が増えてほしいと思います。それと同時に産業界でも量子分野にチャンスを見出していただいて積極的に量子分野の優秀な人材を雇用してもらい，量子分野の人材がいろんなところで活躍できるようになるといいと思っています。

2022年5月刊行 ”光”のエッセイが登場！

梅干しとひかり

ひかりがたりすと
納谷 昌之

体裁：A5判 約200頁　定価：2,640円（本体2,400円＋税）　ISBN：978-4-902312-69-0

光のオンライン書店　http://shop.optronics.co.jp/