

# Compute by “Cooling” Quantum System

## 量子コンピュータへの道

### 情報処理の未来を告げる、量子の不思議な世界

新聞などでときどき取り上げられる「量子コンピュータ」とはいったい何なのか、私たちはまだ、ほとんど知らない。というのも、それが何から作られ、どんな形になるのかといったその姿が、未来にゆだねられているからだ。とはいえ「量子コンピュータ」は「量子」のもつ性質を原理として考えられたコンピュータであり、その「量子」の側から見ると、現在私たちが使っているコンピュータはすべて「古典的コンピュータ」なのだという。そして量子コンピュータなら、現在世界中にあるすべてのコンピュータが、指先に載るたった1枚のチップに収まる可能性があるのだそうだ。そんなとてつもなく新しい情報処理にチャレンジする、国立情報学研究所(NII)の研究プロジェクトを訪ねた。

2006年にスタートしたこの研究プロジェクトは、理論と実験の双方の専門家を集めた5年間のプロジェクトであり、今まさに佳境を迎えている。リーダーを務めるNIIの山本喜久教授に、まずプロジェクトの目的について聞いた。

「我々のミッションは、目的に応じて計算の規模を大きくしていくことができるような量子計算をどう実現するのか、その技術を見つけ出すことです。これまでも世界中でいろいろな方法が試されてきていますが、成功を収めると思われるアプローチは、現在まだ見つかっていません。そういうわけで実はこれ、まさに大問題であるといえるわけなんです」。

必要に合わせて計算の規模を大きくすることができるシステムを「スケラブル」であるといい、これをクリアすることは、量子情報処理研究が抱える大きな課題のひとつである。とはいえ、なぜ量子計算の技術が、世界が注目するような大問題となるのだろうか？

理由のひとつは、「ムーアの法則」と呼ばれる有名な法則——コンピュータのプロセッサの性能は約18カ月で2倍になる——に由来する。“より速く”といっても、どんな物であれ、速さは光速を超えることができない。そこで回路そのものを“より小さく”することにより、コンピュータは実際ほぼこの法則に沿って発達してきたのである。とこ

ろが極小の世界は、量子の活躍する世界でもある。つまり、私たちのプロセッサのサイズはついに量子の領域に迫っており、もし次の手が見いだせなければ、輝かしい半導体の発達の歴史がそこで立ち往生してしまう。これこそ、まさに「大問題」というわけだ。そこでたちまちこのやっかいな量子性を理解し、それをコントロールしなければ、という課題が切迫したものとなってくる。

21世紀に入ると、主に極小の世界に見られる量子は「量子情報科学」という新しい分野を生みだし、目まぐるしいほどの発展を遂げていくのである。

#### 「キューバス」という切り札

このような潮流を背景として2005年、これまでの常識をくつがえし、光量子コンピューティングに新時代の到来を告げる画期的な理論が現れた。提案したのは、NIIの根本香絵准教授と英国ヒューレットパッカード研究所の共同研究グループである。翌2006年、彼らはこの成果を継承発展させ、光だけでなく多様な物理系に広く適用可能な理論として発表する。それが「キューバス量子コンピュータ」である。

グローバルに発展する量子情報科学の分野で、これらの提案はいわば「コロンブスの卵」として迎えられた。いままで研究に携わる誰しもにとって



**Yoshihisa Yamamoto**  
山本喜久 国立情報学研究所 情報学プリンシプル科学研究系教授



**Kae Nemoto**  
根本香絵 国立情報学研究所 情報学プリンシプル科学研究系准教授

大きな壁と考えられていた問題を、理論的に突破する。「すると分野にまったく新しい視界が開けて、研究が活気づいてくる」と、根本准教授はいう。彼女の指導教員だったジェラルド・ミルバーン教授(豪州クイーンズランド大学)も、かつてそのようにして線形光学によるブレークスルーで新時代を拓いた、光量子コンピュータの立役者だ。そこでまず根本准教授に、キューバスの特徴をたずねた。

「キューバス量子コンピューティングは、計算の基本単位である量子ビット(キュービット)と量子通信路(バス)とを相互作用させ、これを素子として現実に開発可能な方法を示した点に特徴があります。キューバス量子計算の原理となる素子は物理的にも新しく、またさまざまな材料を使って実現できることから、まさにこれからさまざまな実験成果が期待できます。私たちの理論では、このような素子が実現すれば、量子計算・通信・ネットワークのすべてに利用可能なスケラブルな情報処理が可能です」。ひと言でいえば、キューバスこそ、量子コンピュータへの道に大きな実現可能性を拓いたのである。

## 超伝導体を量子ビットとして使う

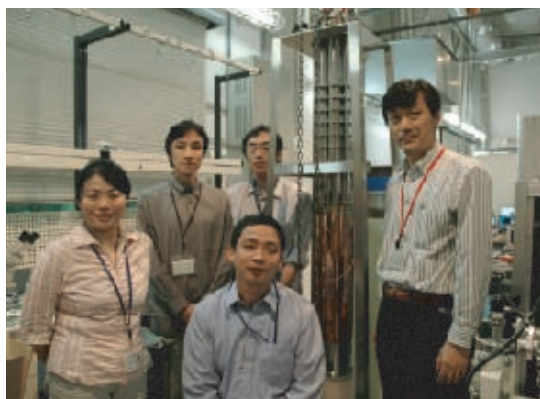
そこでプロジェクトには、キューバスに可能性を見いだした実力のある実験チームが集まった。そのひとつがNTT物性科学基礎研究所の仙場浩一博士率いる超伝導量子物理研究グループである。

「現在僕らが取り組んでいるのは、超伝導量子ビット間のエンタングルメントを1個の光子を介して制御することです」。超伝導量子ビットは、仙場博士が「導線で外界と繋がれた人工原子」と呼ぶように、原子の代わりに、アルミニウムで作った微細な回路を量子ビットとして利用するのが特徴だ。回

路の一边はおおよそ数ミクロン、ふつうの原子の約数万倍の大きさである。そのような多くの原子を含む系が、1つの大きな原子のように「状態の重ね合わせ(\*1)」や「エンタングルメント(\*2)」といった、量子の不思議な性質を示すことが分かってきた。

「アルミニウムは約1ケルビンより低温では抵抗ゼロで電流が流れます。これが超伝導ですが、実験はさらに低温、室温の約1万分の1の30 ミリケルビンで行います(下の写真説明を参照)」と仙場博士。そこで実験は、高さ3メートルを超える巨大な希釈冷凍装置の中で行われる。「量子ビットとして利用する回路の周囲に、マイクロ波共振器という別の回路を作り、共振器中の単一モード光子をキューバスとして使い、他の量子ビットと連携していくわけです」。

超伝導量子ビットの実験は現在、量子ビットと単一光子のエンタングルメント制御まで成功しており、今後、複数の量子ビットゲートを実現することに取り組むのだそうだ。仙場博士に今後の課題について聞いた。



希釈冷凍装置と仙場博士のグループのみなさん。30ミリケルビンとは、まさに超低温の世界である。これ以上は低くならないという温度を「絶対零度」といい、これが0ケルビンだ。ちなみに室温(約27℃)は、300ケルビンに相当する。

(\*1) 古典的な1ビットは「0」または「1」のいずれかであるが、1量子ビット(キュービット)の量子状態は、「0」と「1」がいくぶんかずつ重ね合わさった状態にある。量子の世界では、たとえばスピンなら「右回り」であると同時に「左回り」であるといったことが起こるのだ。古典的な場合に比べてたいへん豊富な性質を持つが、私たちの現実世界では出会うことがないため、なかなかイメージしにくい。

(\*2) 2つ以上の量子ビットが相互作用して、「2つで1つ」の状態を構成しているもの。「量子絡み合い」ともいう。エンタングルメントは非局所的な性質を持ち、エンタングルした量子ビットを引き離しても、「2つで1つ」の状態を保つことができる。エンタングルメントは、量子に特徴的な性質であり、ほとんどの量子情報処理において重要な役割を担う。量子テレポーテーションも、エンタングルメントが可能にするプロトコルだ。

# Compute by “Cooling” Quantum System



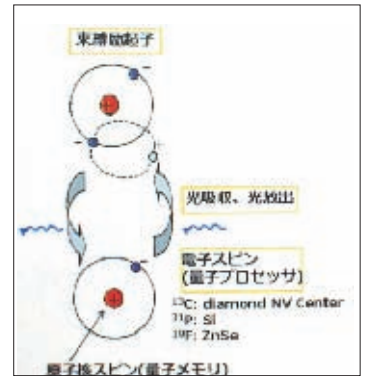
**Kouichi Semba**

仙場浩一 NTT物性科学基礎研究所 超伝導量子物理研究グループリーダー



**Kohei M. Itoh**

伊藤公平 慶應義塾大学理工学部 物理情報工学科教授



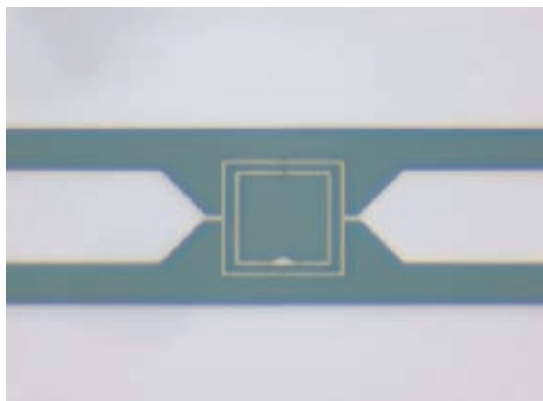
NII山本教授グループの光によるキューバス量子コンピューティング。光の吸収と放出により入れ替わる励起子状態の概念図。

「今、最も重要なのは、ノイズが入ってこない回路をいかに実現するかです。超伝導量子ビットはアクセスしやすい反面、その大きな回路を通じて外界との相互作用が起こってしまうのが欠点。これらをカットする方法を、今後地道に改善していきたいと考えています」。

## 光を使ったスタンフォード大の研究グループ

一方、米国スタンフォード大学では、山本教授が率いる実験チームが光を用いたキューバス量子コンピューティングの実現に取り組んでいる。山本教授はいう。「僕らの場合にはキャビティQEDというものを組み、小さな箱（量子ドット）の中に電子を閉じこめて、これに光を当てて相互作用させます」。

光を使った方法の問題点をひと言でいうと、超伝



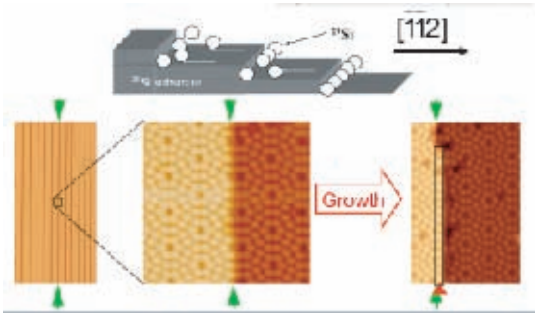
仙場博士（NTT物性科学基礎研究所）の超伝導回路の実写。これを希釈冷凍装置に入れ、超低温にすると量子ビットとして使うことができる。

導体のちょうど逆だ。私たちの周りにはこんなにも光があふれているのに、光と光は相互作用しない。つまりふつうにあるだけでは何も起こらないから、閉じこめておいてなんとか相互作用させようというしくみがキャビティQEDなのである。このようなキャビティを2つ置き、光のパスを介して情報をやりとりする。

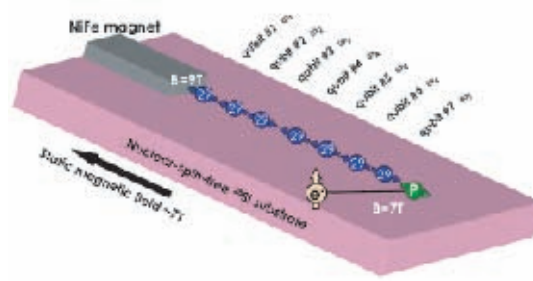
「半導体中のドナー不純物と呼ばれる物質を使い、この中にある電子スピンの光パルスを当てることで、電子の持つスピンをコントロールする実験が比較的順調に進んでいます。光を受け取ったのか放出したのかによって電子スピンの状態が変わる。この状態の変化（励起子状態）を使って、さらに電子スピンの状態を読み出せるようになってきました」。

ところで一般に量子状態は壊れやすいことが知られている。量子性が維持できる時間のことを「コヒーレンス時間」と呼び、山本教授のシステムでは、これを約1ミリ秒と、従来と比べて飛躍的に伸ばしているのも大きな成果だ。これによって電子スピンをどれだけの回数操作できるかが決まり、それによって何度ゲート（論理回路）を組めるかが決まる。早くも量子コンピュータの性能について議論しているのかと錯覚するほどだが、山本教授はその先を見る。「キューバスを現実の技術として実現するためには、どうしてもキャビティ中の光の損失が大きすぎる。これを回避するシンプルで効果の高い方法——それこそが、今後大きな焦点になるだろうと思うんです」。





伊藤教授(慶應義塾大学)の、階段状の端に並んだ29シリコンの様子と模式図。



一列に並んだ29シリコンの先に読み出し用のリングがついている。(伊藤教授の資料から)

## 一列に並んだシリコン同位体を使って

そしてプロジェクトにはもう一人、世界でも珍しい、シリコンの「同位体」研究で知られる、慶應義塾大学の伊藤公平教授がいる。

同じ原子でも、持っている中性子の数が違うものを同位体といい、シリコンの場合には28、29、30という3つの同位体がある。このうちまず原子の中にある核スピンの向きで量子ビットを構成できないか、というのがそもそものアイデアだ。

伊藤教授はいう。「1つ1つの核スピンを初期化できるのか、読み出せるのか、きちんと計算に相当する動作をしてくれるのか、……確認しなければならないことは山ほどあります。でも、あきらめるわけにはいきませんよ(笑)」。

シリコンで本当に量子コンピュータができるのだろうか？ そんな疑問も頭をかすめる。だがその代わり、シリコンには、古典的コンピュータ時代に培った集積化技術のノウハウが詰まっている。そこに他の材料にはないチャンスがある。

伊藤教授のシステムでは、一列に並んだ29同位体のシリコンの末尾にリングが1つ付いており、これを核スピンの読み出しに使う。その先が「キューバス」のバスである。

「リングの核スピんに光を当て、出てくる光の波長を見ることによって、スピンの読み出しに成功しています。また光だけでなく、電流を使って核スピンの読み出しもできるということもわかってきました」と、伊藤教授。研究は着実に成果を上げつつある。「量子性を活かすのか除くのか、それを議論するにもまず、

量子性を理解しなければ始まらない。僕らの道程は基礎研究として意義があるし、さらには産業へとつながって欲しいですね」。

## 量子コンピュータへの道、これから

あと2年半——このプロジェクトが終わる時、量子コンピュータへの道程には、どんな展望が開けているだろうか。

理論物理学者の根本香絵准教授は各実験グループを巡る一方で、未来の量子コンピュータへ向けて、キューバスの持つ可能性を追究する。なにはともあれ、突破する道を示すのは理論の役割であり、糸の特質によらず、新しい発想を呼び込めるのは理論の醍醐味でもある。根本准教授はいう。

「量子ビットを測定することによって計算を行う〈測定ベース〉の量子計算では、キューバスによって、これまでの限界を超えて大幅に効率化できることや、キューバスのシステムは意外にも光の損失に強い面があることなど、さまざまな性質が見えてきています。このような性質を最大限に引き出す素子デザインやアプリケーションもいろいろと研究中です」。キューバスという理論は、発表当初の衝撃を超えて、どうやらさらなる進化を遂げているらしい。さらに「測定ベースの量子計算にはどうしても大量の量子ビットが必要です。では、たとえばそこに、安くて大量に投入できる光を使ったらどうか。実はこのようなシステムにキューバスが効くこともわかってきています」と根本准教授はいう。

どんなアイデアが、量子情報処理の新しい方法を拓くのか。量子コンピュータの実現へ向けて、プロジェクトのゆくえが楽しみだ。

(取材・構成 池谷瑠絵)