



## プロフィール

学歴	1976年 東京大学 工学部 物理工学科 卒業	職歴	1978年 日本電信電話公社 武蔵野電気通信研究所 基礎研究部(現 NTT基礎研究所) 研究員
	1978年 東京大学 大学院工学系研究科 修士課程 修了		1985年 日本電信電話公社 武蔵野電気通信研究所 基礎研究部 研究調査員(現 主任研究員)
	1986年 東京大学工学博士		1986年 マックスプランク固体研究所(独) 客員研究員
			1989年 NTT基礎研究所 主幹研究員
受賞歴	1998年 久保亮五記念賞		1990年 NTT基礎研究所 研究グループリーダー
	1998年 日本IBM科学賞		1994年 NTT基礎研究所 研究グループリーダー兼特別研究員
	2000年 NTT先端技術総合研究所 研究開発賞		1995年 デルフト工科大学(蘭) 客員教授
	2001年 The Quantum Devices Award		1998年 東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 教授
	2002年 仁科記念賞		2004年 東京大学 大学院工学系研究科 物理学専攻 教授
	2004年 紫綬褒章		2012年 CNRSナール研究所、ジョセフ・フーリエ大学(仏) 招聘教授
	2007年 江崎玲於奈賞		2013年 理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子情報エレクトロニクス部門 部門長
	2008年 応用物理学会フェロー		理化学研究所 創発物性科学研究センター 量子機能システム研究グループ グループディレクター(現職)
	2011年 英国物理学会フェロー		2018年 理化学研究所 創発物性科学研究センター 副センター長(現職)
	2018年 第18回応用物理学会業績賞		

国立研究開発法人 理化学研究所 創発物性科学研究センター 副センター長  
量子情報エレクトロニクス領域 領域長  
量子機能システム研究グループ グループディレクター

た る ち ゃ せ い ご  
樽茶 清悟 先生

今回のSamco-Interviewは、理化学研究所を訪ね、創発物性科学研究センター 副センター長の樽茶清悟先生に量子情報処理のご研究についてお話を伺いました。

## ▶ 樽茶先生のご研究についてご紹介ください。

現在は、半導体でできた量子ドットと呼ばれる非常に小さな電子の入れ物を使って、電子のスピンを量子力学的な情報単位とする量子コンピュータや、量子コンピュータのネットワークを作るための光子とスピンの相互変換、トポロジカルな性質を持つ粒子を用いた新原理の量子コンピュータなどを研究しています。

## ▶ ご研究の現在に至る経緯についてご説明ください。

電子を1個ずつ蓄積できる量子ドットの研究は1994年に始めました。当時は量子ドットの中の電子を1個ずつ変えるという単一量子トンネル効果の実験が盛んに行われていました。その中で原子の中の電子と同じような性質を持つ半導体デバイスを作ることができないかと考え、1996年に円盤状の回転対称性を持つ微小な量子ドット(人工原子)の作製に世界で初めて成功しました。これを使って伝導電子を0個から1個ずつ正確に変えること、さらには原子に類似した量子力学的規則に従って電子のエネルギーやスピンの状態を高精度に制御することができるようになりました。電子の持っている量子力学的な性質や電子と電子の相互作用、それらに由来する量子現象をうまくコントロールできるようになり、その中で電子のスピンはとてもハンドリングしやすく、情報担体として優

れているということが分かりました。これらの人工原子をベースにした量子力学的な実験や電子の性質の解明は、1998年から2004年までの科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業(ERATO)である『樽茶多体相関場プロジェクト』で行いました。ERATOプロジェクトの終了後には、その継続版として2005年から2010年まで国際共同研究事業(ICORP)で研究を進めました。このICORPを始めるにあたって、スピンをういた量子コンピュータの理論提案(1998年)に刺激を受けて、人工原子を使ってこれを実現できるのではと考えました。1個の電子で最小単位の情報デバイスができないかということは、量子ドットの研究を始めた頃から考えていました。量子コンピュータへの応用には、電子スピンを高精度にコヒーレントに操作することが必要で、難しい実験であることは分かっていましたが、躊躇はありませんでした。そしてICORPでは、量子コンピュータを作るための情報単位である量子ビット、そのもつれ状態に関する基礎実験に成功し、それを基に10年ほど前に量子コンピュータの研究を本格化しました。

最初の時期は量子ドットをIII-V族系の化合物半導体であるガリウムヒ素(GaAs)で作っていましたが、この4~5年は量子ビットの集積化に適しているシリコン(Si)で作っています。

## ▶ 量子情報処理のご研究の展望についてお聞かせください。

現在、グーグルやIBM、インテルなどでは、大規模な投資による超伝導量子コンピュータの開発が進められていて、100ビット程度の動作が実現されています。しかし、量子コンピュータで技術革新を起こすにはまだ不十分で、10万ビットや100万ビットという桁違いの規模のものを作らなければなりません。また、ビット数が大きいだけでなく、計算の途中で起こるごくわずかな誤りを訂正する機能を持たせる必要があります。このような多数の量子ビットを今の方式の超伝導で作ろうとすると、ビット当たりの寸法が1mm<sup>2</sup>くらいと大きいので全体で1m<sup>2</sup>もの大きさが必要になります。また、超伝導は0.1K(ケルビン)以下という非常に低い温度でなければ安定して動作しません。現在の100ビットのものは1cm<sup>2</sup>くらいの試料ですので、通常の冷凍機の収納スペース、冷却能力で賄えますが、ビット数が増えると難しくなります。

一方、我々が研究しているSiスピン量子コンピュータはビット当たりの面積が0.3μm<sup>2</sup>くらいなので、1cm<sup>2</sup>には1億ビットくらい入る計算になります。また、現在の実験は大抵の場合、超伝導と同じく極低温で行っていますが、Siの量子ビットは1K以上でもよく動作することが報告されています。これらの点においてSi量子コンピュータは魅力的です。Si量子コンピュータは遅れてスタートしたこともあってまだ数ビットの規模にとどまってい

ますが、これをさらに大規模化するにはSi集積化技術の導入が不可欠です。数十から100ビットくらいなら頑張れば我々でも作れるかと思いますが、100万ビットを作るには半導体デバイス製造の力が不可欠だと思います。しかし、残念ながら現在の日本の産業にとって半導体デバイスは良い開発対象ではなくなってきています。日本の製造産業の人たちは量子コンピュータへの関心はあると思いますが、長期的な視野で開発をしていくだけの体力がなさそうに思います。

ところが海外では状況が違っていて、インテルやIBM、フランスのLETI、ベルギーのIMECといった半導体デバイスの製造機関が本格的にSi量子コンピュータの開発に参入しています。CMOSあるいはFinFETと呼ばれる薄型のトランジスタを使って量子コンピュータのプロトタイプを作ろうとする研究が進んでいます。私は、個人的には当面そういった機関とうまく連携して開発を進め、10年ほどで大規模化、さらには誤り訂正の実装に目途を付けることが重要と考えています。

量子情報技術は、言わば高精度、高感度、高速に量子の性質を操作し、計測するものであり、さまざまな応用の道があります。電子スピンの言えば、量子ビットの動作原理は磁気共鳴(MRI)と同じであり、測定の精度や感度をどのようにすれば上げられるかという技術面ではMRIに共通するところがあります。また物理としては、量子情報技術はミクロスコピックな電子、フォトン、フォノンといった個々の量子がマクロスコピックな物理現象の中でどのような役割を果たしているのかということを厳密に調べる技術を提供します。これらは、いずれも量子力学に立脚した原理や技術を基盤としていて、それをコンピュータの演算に使うか、物性測定に使うか、あるいはその背景を与える物理の解明に使うかという違いがあるだけです。この意味では、量子情報技術の研究は、ゆくゆくはコンピューティングへの応用だけでなく、もっと広い範囲で役立つのではと考えています。

### ▶ 日頃の研究において心がけておられることはどのようなことでしょうか？

心がけていることはいくつかあります。二択三択で迷った場合は一番難しそうなものを選択する、物理と工学の両方のセンスを大事にする、一つのことに固執せず、良さそうなことは積極的に取り入れるといったことです。また、実験を進める上で、他人の提案を簡単には信用しない、たとえ著名な先生の話でも、実験的に

は非現実的なことがよくあります。

また、特に若い人たちのアイデアをすぐには否定せず、まず良い点を探してなるべく奨励するというのも心がけていることの一つです。話が進展するようなディスカッションを行い、その中で良いアイデアが生まれてくることを期待することは、研究室や全体のレベルアップにもつながっていくと思っています。ほかには、若い人たちに刺激を与えられるベストな研究環境を提供するというのも大事だと思っています。

### ▶ 座右の銘をお教えてください。

『努力は必ず報われる』です。以前は単純に自分が努力すれば必ず成功に近づくと思っていましたが、この10年くらいは周囲の人、特に若い人の努力は必ず報われるようにしてあげなければいけないと思うようになりました。今私にとってこの言葉には、より良い研究環境を作るとか、できるだけ前向きに討論をするという意味も込められています。

### ▶ 休日などはどのようにお過ごしでしょうか？

平日と休日ではあまり変わりません。外国の論文を読んだり、自分たちの論文を添削したり、書類を書いたりしています。しかし、コンピュータだけに向き合っていると疲れますので、ポーッとテレビを見ていることもあります。毎週日曜日は、体調管理のためにエクササイズに通っています。体調が健全な状態でないと集中力を保ち難くなるので、能率が上がりません。体を鍛えるというより体調管理の一環としてエクササイズに励んでいます。そのほかには、散歩をしたり、家内の買い物について行ったりもします。体を動かしているとき、ぼんやりテレビを見ているときにアイデアが出てくることが意外と多いです。

### ▶ 最後にサムコに対して一言お願いします。

サムコさんのエッチング装置は、東大でも理研でも使っておりますが、非常に信頼性が高く安定しており、安心感があると好評です。量子コンピュータや量子力学的なデバイスを作るためにはさまざまな装置を使い、また普通とは違った使い方が必要になることもあります。ユーザーフレンドリーでフレキシビリティを持った装置を提供してもらえればと思います。

**お忙しいところ貴重なお時間を頂き、誠にありがとうございました。**