



プロフィール

学歴	1983年	大阪大学 基礎工学部 電気工学科 卒業
	1985年	大阪大学 大学院 基礎工学研究科 電気工学分野 修士課程 修了
	1988年	大阪大学 大学院 基礎工学研究科 電気工学分野 博士課程 修了 工学博士
職歴	1988年	理化学研究所国際フロンティア研究システム 研究員
	1991年	理化学研究所半導体工学研究室 研究員
	1996-1997年	デルフト工科大学(オランダ) 客員研究員
	2003年	理化学研究所 主任研究員

特定国立研究開発法人 理化学研究所
石橋極微デバイス工学研究室 主任研究員

(兼)理研創発物性科学研究センター(CEMS)
チームリーダー

(兼)東京工業大学 特定教授

いしはし こうじ
石橋 幸治 先生

今回のSamco-Interviewは、理化学研究所を訪ね、石橋極微デバイス工学研究室 主任研究員の石橋幸治先生に新機能ナノエレクトロニクスのご研究についてお話を伺いました。

▶新機能ナノエレクトロニクスのご研究についてご紹介ください。

電子の量子的な状態を電子1個単位で制御する研究を行っています。そして、これまでとは全く違った原理で動作するデバイスに応用できればいいなと思っています。具体的な応用例としては量子コンピュータのもとになる量子ビットや量子ゲートを挙げることができます。また、制御の対象は電子に限るわけではありません。超伝導を起すもとになるクーパーペアや半導体に光を照射したときに生成される励起子も制御の対象としています。これらは量子力学の原理に従ってふるまうので、その原理に従って制御することは究極の制御です。もっとも簡単で本質的な例としては、2準位を持つ物理系、すなわち2準位原子を人工的に作り出すことです。これは量子ビットそのものです。これに通常マイクロ波領域の周波数の電磁波を照射して、量子状態を制御する、すなわち量子ビットの操作を行うこととなります。このように物質を量子的に制御する“量子技術”に関する研究が最近盛んになっており、量子コンピュータや量子通信のみならず、極限計測分野などにも応用が期待されています。我々も量子技術を使って、まず電荷、電磁波、磁界の極限計測へ応用できないか考えています。

量子的な効果はサイズが小さければ小さいほど顕著に現れます。そこで我々は、半導体ナノワイヤ(InSb, InAs, Ge/Si)やカーボンナノチューブなどのようにボトムアップ的にナノスケールの構造が実現される材料を積極的に使っています。具体的な構造としては、電子を狭い領域に閉じ込める量子ドットや、半導体などを超伝導体で挟んだSNS構造といわれるものを作っています。これらを使って人工的な2準位を実現したいのです。ナノチューブやナノワイヤそのものとはとても細いものですが(カーボンナノチューブでは直径が1nm程度)、これにゲート電極を付けたり、電流電圧端子を付けたりするのに電子ビーム

露光や酸化膜堆積などのトップダウン技術を用います。まだ個別デバイスしか作ることができませんが、集積化するためにはボトムアップ技術とトップダウン技術を融合するような技術が必要です。そのためにはナノ加工技術にもブレークスルーが必要だと思います。

これまで伝統的な半導体を主に扱ってきました。しかし、最近は量子的な性質が顕著となる新しい材料がどんどん出てきているので、対象とする材料も広げたいと思っています。その例としてトポロジカル物質というのに注目していて、それを超伝導体で挟んだSNS接合、トポロジカルジョセフソン接合の研究を、研究室の若い人が始めています。それ自身基礎研究としてとても面白いのですが、普通の量子コンピュータとは違うトポロジカル量子コンピュータへつながるかもしれません。

▶ご研究を始められたきっかけと経緯についてお聞かせください。

私は大阪大学基礎工学部電気工学科で半導体プロセスを研究されていた故難波進先生の研究室で1988年に博士課程を修了しました。先生は「うちには小さいものを作る技術があるから、それを使って物理をやりたい」、とだけいわれました。当時は、“ナノ”という言葉は一般には出回っていなかったのですが、今から考えると、先生はナノスケールの新しい物理の世界、今でいうところのナノ物理ですが、それが開けるような予感を感じておられたのかもしれない。量子物理に興味があった私にはちょうどよいテーマでした。何かデバイスに応用できないかと考え、小さな輪を作って電子の波を干渉させるという実験を行いました。これは原子1個といった本当に小さなスケールであるミクロの世界と我々が普段接する1cmや1mmというスケールであるマクロの世界の中間という意味での“メゾスコピック”な、しかも、しかも人工的に制御して作ったメゾスコピックな世界の物理の始まりにかかわる研

究でした。トランジスタでは量子的な効果(波としての電子)を積極的に使いませんが、電子の波としての性質を直接実験で見たかったので。それがきっかけとなり、量子効果を突き詰めようとして今に至っています。私は20年ほど前に量子コンピュータのことを知ったのですが、それは電子の量子的な性質を存分に制御する技術です。まさにそれをやりたくて現在の研究を行っています。

▶石橋先生の研究室が量子効果デバイス研究チームとして参画されている創発物性科学研究センターについてご紹介ください。

創発物性科学研究センターは2013年4月に発足しました。創発物性とは多数の電子が独立して勝手にふるまうのではなく、協奏してふるまうことにより初めて生まれる新しい物性です。この創発物性科学の基礎研究を行い、根本的に新しい原理によってエネルギー・環境問題に貢献することをミッションとしています。センターは「強相関物理」「超分子機能化学」「量子情報エレクトロニクス」の3つの部門に分かれており、物理、化学、エレクトロニクスの3つの分野のシナジー効果を期待しています。私の量子効果デバイス研究チームは量子情報エレクトロニクス部門に所属しています。量子コンピュータは部門の中の重要なテーマの一つで、物理、材料、デバイスレベルでの基盤技術の確立を目指しています。電子のスピンに着目したスピントロニクスもセンターでの重要な研究テーマの一つです。省エネルギーを目指した材料・デバイス研究の多くは近い将来に目標を絞っていると思いますが、新しい量子技術を積極的に使って長期的な視野から課題解決に挑戦していることも大きな特徴だと思います。

▶委員長を務められている日本学術振興会産学協力研究委員会『先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会』についてご紹介ください。

この委員会は、1986年に私の指導教官の難波進先生を中心に「極限構造電子物性第151委員会」として設立されました。“ナノ”という言葉がなかった頃のため堅苦しい名前ですが、ナノテクノロジーで新しい物理を拓こうということで産業界、特にエレクトロニクスメーカーが中心となって始まりました。設立から30年経ち、ナノテクノロジーは物理だけではなく、化学、材料、バイオなどにも広がっています。エレクトロニクスにおいても、集積回路の微細化だけでなく、太陽電池、燃料電池などのエネルギー関連分野、フレキシブルエレクトロニクスなど、今やナノテクを使っていないものはないくらいです。これからどういう方向に向かうのか、どういう産業の種が生まれるのか、これらは非常に難しい問題ですが、半導体の次にどのような産業が将来出てくるのかということ、産官学が一緒になって探索しています。委員は学会から80名程度、産業界からは電気メーカーを中心に、20社程度の参加をいただいています。サムコさんもぜひご参加いただき、新しいエレクトロニクスの種を一緒に考えていただければ幸いです。

▶ 今後のご研究の展望についてお聞かせください。

最近、量子情報エレクトロニクスが夢物語ではなく、やっと具体化してきましたが、その実現は決して容易ではありません。シリコン(Si)エレクトロニクスは膨大な学問分野になっており、さまざまなレイヤーがあります。非常に高純度なSiという材料、デバイスとしての超微細なトランジスタ、その間にはサムコさんがされているようなプロセス技術があります。デバイスをつなげて回路にします。さらにアーキテクチャとソフトウェアがあり、上手く機能しているかを調べる検査技術があります。一つのエレクトロニクスをシステムとしてみると非常に膨大な研究分野の集合体であり、とても一つの研究室で手に負えるものではありません。量子情報エレクトロニクスにおいても同じです。デバイスの動作原理が全く異なるために、その上位レイヤーも全く異なるものになるでしょう。我々の研究室では、現状、動作原理の物理、材料・デバイスのレイヤーの研究が主です。回路やアーキテクチャの研究者も世界的には出てきていますが、共通の言葉が確立していないような状況なので異なるレイヤーの研究者となかなか意思疎通ができません。それができるように私ももっと勉強をしなければならぬのですが、恥ずかしながら実際には全然できていません。もっとも、量子効果をデバイスに利用するための物理的な原理研究もやるのがいっぱいあります。最近出てきたトポロジカル量子コンピュータでは、その概念自身が大変理解しにくいものです。自分の不勉強を思い知るところですが、若い人に引っ張ってもらいながら何とかついていきたいと思っています。

▶ 弊社の装置をどのように

ご使用いただいておりますか？

最近、半導体ナノワイヤやカーボンナノ

チューブのようなボトムアップ的に小さなサイズを持つ材料を使うようになったので、トップダウン的に材料を削って小さな構造を作ることがなくなりました。かつてはサムコさんの平行平板型RIE装置をよく使っていました。とはいえ、プラズマCVD装置はシリコン酸化膜(SiO₂)やシリコン窒化膜(SiN)のゲート絶縁膜形成に現在もよく使っております。理研に入った1988年当時、今というナノ加工を行っていたのは私が入った研究室だけでしたので、我々が全部装置をそろえなければなりません。その後、ナノテクノロジーが普及し、理研でも2000年頃にナノサイエンス実験棟という共同利用施設ができ、そこにナノ加工関係の装置が多く入りました。サムコさんの装置も入っており、使わせていただいています。

▶ ところで、休日などはどのようにお過ごしでしょうか？

量子デバイスの分野では新しい概念がどんどん入ってくるので、勉強していないとついていけません。学生時代に勉強したことで、新しい概念に接してみると、情けないことにあやふやなことが多々あります。そのたびに昔の教科書を読んだりしていますが、若い頃のように根気が続きません。また、外国人と話すことが好きで、休日に英会話学校に通ったりしています。中学・高校の頃、英語はあまり好きではなかったので、大阪大学を志望したのは、当時は二次試験に英語がなかったというのも理由でした。ところが研究の世界に入ってみると、外国人と接する機会が多く、彼らは考え方が違うことが多く新しい発見があります。何とかもっとそれを楽しめるようになりたいと思っています。家でゴロゴロしながら2時間ドラマを見ていることもあります。囲碁が好きなのですが、打ち始めると長時間になるので、実際には打っていません。日曜日昼のNHK杯テレビ囲碁トーナメントを見て楽しんでいます。

▶ 最後にサムコに対して一言お願いします。

80年代中頃、私が学生の頃に使っていた簡単な平行平板RIE装置では、バルブ操作はすべて手動で、ガスのコントロールやエッチング条件の制御は難しく、経験に頼ったプロセスをしていました。しかし、サムコさんの装置を使わせてもらって、簡単なボタン操作で制御でき、「すごいな」と感心しました。

新しいデバイス・エレクトロニクスには新しい材料が使われます。そして、必ず微細加工を伴います。装置メーカーは大変だと思いますが、多様な材料に間口を広げていただければありがたいです。まだ海のものとも山のものともわからない材料のプロセス開発を、装置メーカーとユーザーと一緒に進めることができれば効果的です。フレキシブルに対応していただければ幸いです。

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。