

伊藤公平教授インタビュー

日時：2008.08.05(火)10:00-12:10

訪問先：慶応義塾大学矢上キャンパス (24 棟 509 号室)

インタビューア：中川正広、佐々絃一、佐藤勝昭

研究課題：同位体制御による半導体物性のデザイン



http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_gr

Q: 領域終了後 5 年経ち、さきがけ 3 年間の中ではできなかったものも、5 年経ってみるとかなり進展が見られるはずということで、フォローアップのために参りました。2月に総括、アドバイザーに集まっていたいただき、インタビューをする対象として 6 名の方を指名していただきました。伊藤先生もその 1 人です。

A: 先日、国府田領域の同窓会があり、「追跡評価があるので協力するように」と言われていました。

Q: さきがけでの総括やアドバイザーはどんな様子でしたか？

A: 私は、外国にいたので、日本の状況を知らず、国府田先生のことをクニフダとお読みしていたほどです。アドバイザーのどなたとも面識が無く、しかも同位体というだれもやっていないマイナーな研究をよく選んでくださったと感謝しています。国府田先生は、研究をこぢんまりとまとめようとする、それはさきがけの主旨ではないと叱咤され、もっと大きな目標に向けて進みなさいと、励ましてくださいました。厳しかったのは、三谷先生をはじめとするアドバイザーの先生方です。もっとも、CREST のアドバイザーはもっと厳しかったです。CREST の方は、「高度情報化社会に資する」というのがマクラにあって、アドバイザーも物性関係者は 1 名だけで、ほとんどが情報の専門家でした。しかし、これも私にとってはよい勉強になりました。

Q: 先生は、さきがけの 3 年目で、シリコン量子コンピュータの提案をされ、山本先生と連名で特許をお出しになっているのですが、ここに進むにあたってどういうきっかけがあったのですか。

A: 実は、同位体工学の新しい展開をねらって、カリフォルニア縦断の旅に出たのです。さきがけのお金で行けたのはありがたかったです。その途中でスタンフォード大の山本喜久先生と知り合ったのがきっかけです。私が、シリコン量子コンピュータの提案をしたところ、だめだと言われました。しかし、学会中に再びお会いしたときには興味をもってください、アイデアを考えてくださって、一緒に仕事をすることができました。 ^{29}Si の核スピンを使おうということです。

Q: ケーンコンピュータではシリコンの同位体 ^{29}Si は使わないのですか。

A: それまでのケーンコンピュータは P の核スピンを使うので、シリコンの核スピンは邪魔な存在で、むしろ一生懸命排除していたわけです。

Q: さきがけでは提案だけで、その後実験的に実証されたのですね。

A: ^{29}Si を一列に並べるという技術は、CREST でやりました。これは、結晶のステップを利用して並べるのです。ステップをまっすぐにそろえるために、電流を流しました。この基板上に ^{28}Si を蒸着すると、原子がステップに張り付くように並びます。こうして蒸着した ^{28}Si が量子ビットを構成します。強い磁場勾配を印加することによって、各量子ビットの共鳴周波数を変えることができ、各ビットの操作をそのビットのみが共鳴する周波数を用いて操作できるようになったのです。

Q: 同位体でできた半導体を研究始めたきっかけはどこからですか。

A: アメリカの大学院時代です。その当時は Ge をやっていました。その後さきがけで Si の同位体単結

晶育成を立ち上げました。同位体はロシアから購入しました。ガスの遠心分離で取り出すのですが、これはウラニウム濃縮と同じで核開発の技術です。当時、ソ連が崩壊して、核技術者の流出を防ぐために、政府が ODA で協力したのです。核技術を民生品に向けるということでシリコンの同位体抽出も行われたようです。

シリコン量子コンピュータの具体的な構成

Q: お書きになった解説では、 ^{29}Si を三次元に並べるという図が書かれていますが、・・・。

A: あれは、最初の提案で、その後、むずかしいことがわかり、改訂版では ^{29}Si を 1 次元に並べる方法でやりました。固体量子コンピュータでは、核スピンの初期化、制御、読み取りの 3 つの要素技術をどうするかですが、 ^{29}Si を周期的に 1 次元にならべ、端に P をおいて、P の核スピンから双極子場をつかって、スピンを次々に拡散していくのが初期化のプロセスです。

Q: また読み取りには、カンチレバーを使うと書いてありますがよくわかりません。

A: 実際には赤外光を用いました。ファイバーレーザを用い、温度を変えて長さを変え周波数を変えた励起光を試料に当て、非常に微細な吸収スペクトルを光電流として読み取ります。励起スペクトルを測定しているのです。さきがけで実際にやったのは Si 中の P の弱い磁場中での ESR です。この系では電子スピン系のゼーマン効果、核スピンによる超微細相互作用が働くのですが、200 ガウスという低磁場では超微細相互作用が支配的で、量子コンピュータとして必要なもつれあった状態 (qubit) の $\alpha | \uparrow \downarrow \rangle + \beta | \downarrow \uparrow \rangle$ の係数 α 、 β を弱い磁場を変えることでコントロールできたのです。水素原子ライクな電子状態のバルマーシリーズについては、よく調べられていてデータがあるのですが、ライマンシリーズについてはデータがありませんでしたから、シリコンでアトムフィジクスをやることができました。

量子コンピュータはいつ頃実現？

Q: 量子コンピュータはいつ頃実現するのですか

A: 光を使う古沢さん、竹内さんのものが王道ですが、固体量子コンピュータも日本が頑張っています。結局、樽茶先生のように半導体量子ドットを使うもの、蔡さんのように超伝導を使うもの、私の同位体を使うものの 3 つくらいが残りました。まだまだ道が遠いけれど、10 年後とっておきましょう。最近、ITRS という半導体デバイスのロードマップ委員会にも関わっています。次世代デバイスを考えるには、技術者だけではだめで、物理屋が関わらないとわからないということが、共通理解になってきたようです。

シリコンの熱伝導の同位体効果—その後

Q: 先生の本に書かれた自己評価書によると、「 ^{28}Si 単一同位体シリコンは熱伝導が 60% も大きいという論文は間違いだということがわかった」と書かれています。あのインパクトのあった論文はその後どうなったのですか？

A: 私が、否定する論文を書いて論争するという手もあったのですが、著者が、私の指摘に納得してくれて、ERRATA を出して一件落ち着いた。私の測定では、残念ながら、熱伝導度の改善は 10% 以下ですね。

半導体の不純物と金属・絶縁体転移

Q: 自己評価書に臨界指数を決めたとありますが、臨界指数とはなんですか。

A: 半導体にドーピングして行くと不純物濃度 N が臨界濃度 N_c を超えると絶縁体から金属に転移しますが、超えたあとの電気伝導度の N/N_c 依存性が $(N/N_c)^n$ の n 乗で増加するとして、この n のことを臨界指

数と言っています。この転移は、不純物分布の乱れによるアンダーソン転移と、不純物同士の接近が電子相関を弱めるモット転移のせめぎ合いできまっています。私は、アンダーソン転移が重要であると結論づけたわけです。これによって **Aspen** での **Anderson** 記念シンポジウムに招かれました。

Q: このほか、Ge 中の Ga をドーピングによらず同位体でお調べになったと書いてありますが、具体的にはどうされたのですか

A: これは Ge の単結晶に中性子を当てて ^{70}Ge を ^{71}Ga に転換したという仕事です。

Si 系超伝導体のラマンによる研究

Q: 先生は、超伝導体の同位体効果をラマン分光で調べておられますね。

A: そうです。これは、さきがけ研究者の谷垣先生との共同研究です。Ba を添加したシリコンクラスタレート $\text{Si}_{46}\text{Ba}_8$ において ^{28}Si を ^{30}Si に変えることで格子振動が変化し、臨界温度のシフトが見られることを確認しました。この超伝導は BCS 理論で説明できることもわかりました。

Selete のシミュレータ開発に参画

Q: 先生は、次世代半導体のシミュレータ開発にも関わっておられるのですね。

A: 現在、ほとんどの半導体メーカーはシノプシスという 1000 億円以上もするプロセスシミュレータを使っているのですが、実際に微細構造を作り込むには、プロセスの最中に起きる形状の変化などをキャリブレーションによって修正するのですが、各社の情報がシミュレータ屋を通じて漏れてしまうのです。このために Selete では国産の NX シミュレータを開発しようとしています。これには、シリコン中のシリコンの拡散係数の温度依存性がきちんとしていなくてはなりません。私たちは、同位体超格子を使ってラマン分光を通じて、拡散係数の温度依存性を調べました。この結果、高温側では、格子間原子を通じて拡散するが、低温では空孔を通じて拡散が起きるため、高温側からの外挿では、拡散が小さく出すぎるを見つけました。また、同位体超格子は SIMS の標準試料として使われようとしています。

コメント (佐藤)

- 同位体工学は実にいろいろなところに応用されていることがわかりました。見学をさせていただきましたが、研究インフラはかなり充実しているという印象を受けました。また、外部資金をもっている伊藤先生のような方には、ちゃんとした部屋を使わせるなど大学の姿勢もしっかりしていると思いました。先生は、実にいろんな研究をしておられるけれど、半導体同位体工学という点で一貫しておられることもインタビューを通じてわかりました。伊藤先生は、常に前向きで、どんなことにも積極的にコミットしていこうという姿勢が、すばらしいと思いました。さきがけ→CREST→技術シーズと JST とともに歩んでこられた優等生です。いっそうのご発展を祈るばかりです。