

「量子コンピュータ開発のためのナノテクノロジー」

伊藤 公平 (慶応大学理工学部 助教授)

ご紹介及びお招きありがとうございました。このような機会はなかなかいただけないので感激しております。

(スライド)

きょうのタイトル「量子コンピュータ開発のためのナノテクノロジー」ということですが、量子コンピュータ開発とナノテクノロジーは切っても切れない仲だということを説明できればと思っております。私は慶應義塾に所属していますが、いまご紹介いただいた科学技術振興事業団のプロジェクトの共同研究者はここに示すとおりで、またナノテクノロジーに関しましては、そちらの先端科学技術研究所の白木先生からいろいろと教えていただいております。

発表内容ですが、大雑把に言えば、最初の15分で量子コンピュータのことをお話して、あとの15分でどうやってつくるか、またナノテクノロジーに関連するところをお話ししたいと思っています。

(スライド)

量子コンピュータのメリットです。これは先ほど、私午前中講義で、着いたときに石田先生が、何に役に立つのかちゃんと説明できないといけないところから入ってきたので、ハンマーでガツンと頭を殴られたような気分なんです。まず基本的に一番私が個人的に興味を持っていることは、量子コンピュータができれば、量子力学のいろいろな実験ができるということで、これは一般的に通じる説明ではないかもしれませんが。

次に、量子コンピュータができると何ができるかということ、ショアの素因数分解アルゴリズムという有名なアルゴリズムがあって、現在のコンピュータでは不可能な素因数分解ができることがわかっています。ということは、150桁の素因数分解ができたとしたら——ふつうのコンピュータではできないのですから——何がいけないかというと、現在のCDMA1とか、そのような通信の暗号がすべて破られてしまうということです。ですのでアメリカの軍は非常にこれに興味をもって、何とか量子コンピュータを世界に先駆けてつくりたいと考えています。ではなんで軍事関係みたいな研究をするのだと私はすぐ怒られるのですが、インターネットというのも結局アメリカの軍がつくったもので、その次にセキュリティということですから、量子コ

ンピュータができればセキュリティも逆に上げることもできる可能性もありますので、そういう意味でも次世代の情報科学に役立つということですねらっているということがいえると思います。

最後に、川合先生のお話で、人間はもとを正せばDNAという小さなものからできているというお話がありましたけれども、本当にすべては量子系の積み重ねでできているということです。新しいものをつくる時にコンピュータ・シミュレーションをするのはものすごい時間がかかるのです。特に量子レベルからやると、今のコンピュータでは限界がある。すべて量子力学で私たちの体ができているのだったら量子系で計算のプログラミングをすれば早いのではないかということはファイマンが言っており、それが実現できるかもしれないのが量子コンピュータであります。そういうことで、夢は高いのですが、今できる、役に立ちそうなことは因数分解ぐらいだということをご理解ください。

(スライド)

実際に量子コンピュータが現在のコンピュータとどう違うのかということですが、いまのコンピュータは2進数を使っていますから0と1の組み合わせです。ここに普通の磁石が書いてあります。N型が上を向いているとゼロ、逆を向いていたら1、こういうふうにはゼロと1を定義したとします。これが横に向いていたらどうなるかといいますと、ふつうのコンピュータでは0.5とかいうのありませんので、エラーとなるわけです。それが、これが量子コンピュータでは許されるということです。

ただ許されるのみならず、これは0.5ではなくて、0か1です。0の確率が50%、1の確率が50%、つまり100回測ると50回は1を測定して50回は0を測定するだろうということがわかるわけです。

(スライド)

このような磁石は、ふつうの棒磁石ではできませんので、この磁石は何かということ、実は非常に小さい量子力学で支配される磁石でなければいけない。簡単にいってしまえば、水素原子を一つここに書いてありますが、水素原子の真ん中に原子核の核スピンというのがあります。これが一つの

磁石。またその周りに電子が1個まわっています。電子も磁石の性質を持っていますから、それも磁石の一つ。ですから核スピンや電子のスピンに一つ一つ情報をのせていくというと、ナノテクノロジーとは切っても切れない仲だということが簡単にご理解していただけたらと思います。

(スライド)

では量子コンピュータをつくるためには何をしなければいけないのか。基本的にはこの三つのことができれば量子コンピュータはできません。まず量子力学的な磁石を一列に並べます。一列に並べるのみならず、すべて同じ方向にします。これは全部初期化するといいますが、全部ゼロにすることです。ふつうのコンピュータだとクリアと打てば全部ゼロに向くのですが、このような量子力学的な磁石を同じ方向に向けるとなるとそう簡単ではありません。

次に、それぞれの磁石、例えばこれだけを180度回転させたいとか、この状態によってこれを回転させたいとか、いろいろな操作ができなければいけません。任意のところにアクセスして回転させたりいろいろな操作をしなければいけない。これがアンドとかナンドとか、実際にはエクスクリュージブオア近いのですが、いまのコンピュータの論理回路の演算に相当するところでもあります。

最後に、これを一つひとつ読み出さなければいけないということです。これをすべてやってのけるのが量子コンピュータですから、見ると簡単なんですけど、これを小さいところでやるというのは非常に難しいということはおわかりだと思います。

(スライド)

では、なぜいまのコンピュータで不可能なことが可能になるのかということですが、それは量子並列性ということに集約されています。量子並列性というのは、まさにいま言いましたように、横を向いている状態がつかれるというところに起因します。いま、三つの量子ビット、磁石は三つあります。ですから三つの量子ビットの量子コンピュータを示してあります。これが全部横を向いているということは、これはゼロでもあり1でもある。これもゼロでもあり1でもある。これもゼロでもあり1でもある。ということは、ある瞬間に読み取ると、そのときは000かもしれません。でも次の瞬間に読んでみると010かもしれません。次の瞬間に読んでみると100の可能性もあるわけです。ということは、確率的に000から111までをすべて均等に含んでいる。確率的に含んでいるということは、この000とか111という2進数は10進数でいうと、01234567に対応しますから、0から7までの数を、わずかに三つのビット、三つの磁石で全部を含んでいるということなるわけです。

これが3個、4個、5個、6個と増えていくと何がいいことがあるかということ、一度に含める数が2のn乗でどんど

ん増えていくわけです。2のn乗というのは何個あるかがn個です。これを例えばこういう磁石を200個並べたとすると、2の200乗というのは 1.6×10^{60} ということで、まさにいまの宇宙の中に存在するすべての原子の数に相当します。ですからそのままの数をゼロからずっと並べていけるというのが量子コンピュータの魅力で、これを超並列的に計算していける。200個のスピンをふつうに計算していくと、実はこれだけの種類の数を並列に計算していることになる。ここでもうすでに首をかしげている方がいらっしゃるかもしれませんが、そういうことにしてください。

(スライド)

これで、演算として何ができればいけないかということですが、二つのことができればすべての量子計算ができるということが証明されています。

一つは、いま四つ並んでいますけれども、このうちの1個だけを180度回転させなさいという操作です。これだけを回転させる、またはこれだけを180度回転させる。そういう操作です。

もう一つは、左側の状態によって右側を回転するか回転しないかを決めなさい。左側が上を向いていたら何もしない、左側が下を向いたら回転させる、そういうことができれば量子計算はすべてできる。でもこれを達成しなければいけないということです。

さらに実現に向けて二つのパラメータが重要になります。量子コンピュータの性能指標です。一つは量子ビットの数、これは数が増えれば増えるほど実際に並列計算できる数が増えるからいいに違いありません。もう一つは総演算ステップ数です。いくら磁石をたくさん横に並べられても、一回計算して、その間に磁石がみんなばらばらになってしまったら計算が続かないわけです。ですから計算の間は回転させた磁石がずっとそっちの方向に向いててくれなければいけないわけです。方向ではなくて実際には位相なんですけれども、そういうような時間があるって、どれだけの時間、磁石が正しい方向を向いてくれるかというのが位相緩和時間T2。

あともう一つ考えなければいけないのが、磁石を180度回転させるのにどれだけの時間がかかるかです。磁石を回転させるのに1時間かかったらものすごい遅いコンピュータになるわけですから、それにどれだけの時間がかかるかということになるわけです。そこで電子単位、電子スピン、イオン単位、核スピン、光子とか、いろいろなものに対してどれだけメモリがあるか、またスイッチング時間がどれだけかということ、実際には総演算ステップ数、どれだけ計算できるかというのがここで指標として大きければ多いほどたくさんの計算ができるということになるわけです。

きょうは時間がないので話せませんが、光の場合も、光の粒一個ずつを取り出す技術が必要になってきて、そのた

めには、結論からいうと、ナノテクノロジーが大事になってくる。ただレーザー光線ではだめなんです。赤い光はたくさん光の粒を含んでいますけれども、本当に光の粒一個一個に量子情報をのせようとする、一個だけ飛ばしてそれを検知するという技術が必要になってくる。それはすべてナノテクノロジーが関係してくるということです。

(スライド)

ここで量子ビットのジレンマというのがあります。これがいかに難しいかということ象徴しています。長所と短所があります。例えば私は核スピンといって原子核のスピンを使って量子コンピュータをつくらうとしています。原子核というのは小さくて、外界との相互作用はすごく弱いのです。モーメントが小さいので非常に弱い。ということは、一度磁石をある方向に並べるといつまでもそのままいてくれるのです。大変いいことです。

スイッチング時間も、核磁気共鳴周波数ぐらいの逆数ぐらいですから、まああの時間で、キロヘルツというと今ギガヘルツの時代ですから、皆さん、なんでいまさらキロヘルツのコンピュータつくるのだといわれるのですが、とにかくそれがたくさん横に並んでいると考えていただければ、いくら1回ずつが遅くても、たくさん横に並んでいるわけですからいいわけです。あと、実現可能なステップ数もそれなりにある。

でもこれは短所が問題なんです。短所と長所は実は一緒なんです。外界との相互作用が小さいというのは長所なんですけれども、外界との相互作用が小さいというのも短所でもあります。なぜかという、ずっと横をある方向を向いてくれるということは、外界との相互作用は弱いのです。だから平気でそっち向いてるのです。でも最後にこれを読み取ろうとしましょう。そうすると読み取るときには、読み取る側が何らかの力を感じてくれないと読み取れないわけです、磁石が上を向いているのか下を向いているのか。でもこれも外界との相互作用が小さいと、なかなか読み取れないということで、結局長いこと、何もしないときは相互作用ゼロになってほしい。でも、読み取るときはできるだけ大きい相互作用が欲しいというのが大きなジレンマになっているということです。

(スライド)

量子コンピュータの例としてはいろいろあるのですが、たぶんこちらの研究室でなじみがあるのは、例えばガリウム、アルミニウム砒素とガリウム砒素というものを変わりばんこに乗せていくと、電子はちょうどガリウム砒素というところに入りやすくなるわけです。こういう量子井戸というものがあって、そのときに原子は連続したエネルギーをとらないで、こういういくつかの離散したエネルギー準位をとって、エネルギー準位の下のをゼロ、これは量子ビットのゼロです。上を1、こういうようなことをす

る。例えば下が0,1、こういうようなことをして何か計算をしましょうということをするわけです。

これは具体的にはわかりやすい例ですが、上にある電子はすぐ下に落ちてしまうので、全然情報が保たれません。1であって欲しいのに、またすぐ落ちてしまったら大きな量子計算ができないということていくつか問題が生じる。

(スライド)

これはもっと有名な例ですけれども、これは NEC の中村さん、最近はずア伊さんが、量子ビットを二つをつなげることに成功していますけれども、クーバー対箱量子ビットというものです。ここには大きな超伝導体があって、このところにジャンクションがあって、ここに小さな箱があります。ここは、こことここでトンネル結合で分かれて、このところが箱になっているのですが、言いたいことは何かいうと、この中に電子二つのクーバー対というのが、ある確率とない確率が50%です。ある瞬間にこの箱の中を見ても電子がある。またある瞬間に見るとない。これは、ある確率とない確率が50%ずつをつくれる、それで量子計算が、これをつなげていけばできるということで、これはいま世界最先端の結果といっても間違いのないと思います。

(スライド)

そんなこんなをやっていますと、いろいろな量子計算のつくり方の方法が提案されていて、「実験による量子コンピュータの実現」とありますけれども、例えば原子一個一個を真空中に並べていこうと、そういうことを考えている人もいます。イオントラップです。それから、半導体を使うのだったら、量子ドット中の電荷とか量子ドット中の電子を使うとか、液体ヘリウム状の電子を使おうとか、超伝導を使おうとか、光を使おう、いろいろな方法が世界で試されているのが現状であります。

いま一番進んでいる量子コンピュータは、試験管の中に分子を溶かした量子コンピュータです。それについてはこの次にちょっと話をします。それに近いものをシリコンでやろうとしているのが私たちの研究だとお考えください。

(スライド)

もう一つ、「量子ビット最前線」ということで、今の現状ですけれども、縦軸が何回計算できましたかという一つの指標です。横軸は、何個量子ビットを並べられましたかという指標です。この二つが両方とも、大きければ大きいほどいいので、右上に行けばいくほどいいということになります。

ここでみていただきたいのは、一番下は、量子ビットはできたけれども、一度も計算できていないというところで、こここのところにデルフトの結果とか NEC の結果とかあって、NEC の結果をもうちょっと上に上げるべきです。というのは、2ヵ月前ぐらいに計算に成功しているの、初

めて固体で成功したというようなところがここに出ています。でも残りの全部、これは全部試験管の中に分子を溶かした量子コンピュータです。いま最も進んでいる量子コンピュータは、素因数分解に成功していますけれども、その素因数分解は、 $15 = 3 \times 5$ です。ですからそれは小学2年生ぐらいです。そこまではとにかく進んで皆さん、われわれも大喜びしているというのが現状です。

(スライド)

「溶液 NMR」というのは何かというと、例えばこういう分子を使う。これにはフッ素、フッ素、フッ素と三つついていて、ここに核スピンのあります。これとこれとこれを使って3量子ビットの計算をしますということです。これの核磁気共鳴周波数とこれの核磁気共鳴周波数と、これの核磁気共鳴周波数は、ここにある臭素のおかげで、それぞれ異なります。ですからこれだけを回転させるとか、これだけを回転させるということができるといことです。

最後に問題は、これで量子計算をさせたあとに、このスピンの読み取りたいときです。これだけで読み取りたいと考えても、一つだけの核スピンを読み取る技術がなかなかありません。ということで、こういう同じものをたくさん試験管の中に溶かし込んでやろうということを考えるわけです。ただこれは10の18乗個ぐらい、ものすごい数の同じ分子が試験管の中に溶けていて、これ一つひとつが量子コンピュータです。それがすべて計算をして、最後結果を読み出すときは10の20乗個のシグナルが強まったものを読み取ってやろうということをするわけです。これはアンサンブル平均という使い方がありますが、これを全部まとめて読み取ろう。これがいま最も進んだ量子コンピュータです。

しかしもっともっと大きい分子をどんどんつくっていくのは難しいんです。これは10個ぐらいの量子コンピュータが限界だと思われています。ほかにも理由があるのですが、10個ぐらいが限界だと。でも7個までできて、素因数分解に成功しているといことです。

(スライド)

それではよくないだろうということで、もっと固体でつくってみようということで、ブラス・ケインという人が1998年に有名な提案をしました。これはシリコンの中にリンの原子を1個ずつ埋め込んでいきます。この間隔は20ナノメートルで1個ずつリンを埋め込んでいくのですから、まさにナノテクノロジーです。現在はなかなか難しい。そこに絶縁体があって、その上に電極をつけます。この電極をつけて、ここで何が量子ビットかという、リンの核スピンの量子ビットになります。これが1量子ビット。もう一つが、もう一つの量子ビット。その間で情報交換するのですが、情報交換するのは、真ん中に例えばゲートがついていて、ここにプラスの電圧をかけてやると電子

が思い切りこっちに引っ張られる。しかもこれは低温。100ミリケルビンとかです。低温で行います。引っ張られていって、うまいことこの電子と電子と核スピンの混じると情報交換ができて、量子コンピューティングができるという提案です。

(スライド)

そういうようなことがあるので、われわれとしては、溶液 NMR のいいところと固体のいまのブラス・ケインの提案のいいところ、同じところを取り合せて、何か新しいコンピュータができないかということで、全シリコン量子コンピュータを提案して、いまプロジェクトとして進んでいるといことです。

(スライド)

ここのカギとなるテクノロジーとして半導体同位体工学というのがあります。ここで話をちょっとずらしますが、シリコンやゲルマニウムというのは周期表の一部を切り取ってきたものですが、いまナノテクノロジーといと、どの原子を動かすかということに非常に特化しています。シリコンを動かそうとかゲルマニウムを原子レベルで動かそうと。

もう一つ、シリコンの中には原子量というのがあって、このところに質量数。

(スライド)

実はシリコンは3種類の重さの異なる同位体からできています。シリコンをもってきたら必ずこの3種類の重さの異なる同位体と同じパーセント、92.2, 4.7, 3.1%として混じってます。これ1個ずつ重さが違うというのは、中性子1個分だけ重さが違うのです。でも28, 29, 30という比率で重さが違う。

私たちが提唱する半導体同位体工学というの、このシリコンをそれぞれ同位体を分離して、そして同位体を自由自在に場所と濃度を制御することで新しいシリコンをつくりましようといこととあります。ですから原子レベルよりか、さらに踏み込んだ同位体レベルというのがポイントになります。そんなことをすると何がいか。シリコン中に重さの違うところ自由自在につくれます。もう一つは、シリコンの中には、磁石を持っているものと持っていないものがあります。ですから磁石のある場所とないものを自由自在につくれるといことになるわけです。安定同位体を利用した質量及び核スピン制御といことになります。

(スライド)

このナノテクノロジー、量子コンピュータから離れて、これは古典的シリコンコンピュータ、「量子コンピュータ」に対していまのコンピュータは私たちは「古典コンピュータ」と呼んでいます。古典コンピュータも同位体はよくできるのではないか。例えばシリコン基板を1種類だけの同位体でつくれば熱伝導度が高くなりますから、ペンティア

ムなんかの熱問題が解決できるのではないかとか、こういうところで不純物が動くのですから、それと一緒にシリコンはどうやって動いているのか。シリコンの重さが違うのが、どうやって動くのかを見ることによって、シリコンの拡散というものを同時に見る事ができる。あとここら辺の酸化膜がどうやってできるのかということもいろいろ調べているところでありませう。

(スライド)

例えば、シリコンの酸化膜中のシリコン自己拡散という、重さの違う酸化膜を半導体上に上手につくってあげて、これを熱処理すれば30シリコンが上から下にいく。その重さの分布を見るだけで、どうやってシリコンが動くかということがわかるわけです。

(スライド)

あと、ゲルマニウムの量子ドットという小さなドットをたくさんつくるのですが、これも実はわれわれ同位体を使っていろいろとつくっていて、

(シリコン)

結局同じゲルマニウムでも全然振動の違うドットができて、そこから新しい物理が見えてくるとか、結局振動を変えろということでは電子的な性質も変えるので、重さを変えて新しいゲルマニウムやシリコンができるのではないかとことをしている。

横道にそれでしたが、ナノテクノロジーの先を行くと同位体テクノロジーにいくということを考えているということです。

(スライド)

では、量子コンピュータに戻しますが、われわれはどうやってシリコンで量子コンピュータをつくらうとしているかということ、簡単に言ってしまうと、28シリコンというところの磁石を持ってないシリコンの上に磁石を持っているシリコンの原子だけを一行に並べてあげよう。これで量子コンピュータができるわけです。一つひとつの、これだけを回転させたいとか、これだけを回転させたいということをするために、大きな磁場勾配をつけています。この磁場勾配は、マイクロマシーニングのテクニックを使わなければいけません。

(スライド)

いまの話をもう一度模式すると、28シリコンというまったく磁石のないシリコンの上に29というものを一行に並べてやる。それで磁場勾配を何らかのマグネットでかけてやると、この磁石が感じる磁場と、この磁石が感じる磁場は異なるので、これだけを回転させて、これだけを回転させないということができるようになるわけです。

ただ、最後、これ一つだけでは読み取れないので、さっき試験管の中にたくさん分子を入れたように、コピーをどんどんつくっていくわけです。コピーをつくっていくって、

まとまったシグナルを読み取ろうということをするわけです。量子ビットとしては、上から1,2, 3,4ということになるわけです。こういうものをつくりたい。

(スライド)

読み取りとしては、これは細かいことはいいませんが、われわれが去年発表した形式ですが、こういう量子ビットがたくさんついているものがマイクロカンチレバーの上に乗っていて、このマイクロカンチレバーはMRFMという核磁気共鳴の最も感度の高い読み取り方法で、これを使って読み取ろうと。いまIBMのアルマデン研究所では、このような方法で、電子6個までのスピンの読み取れるようにまできています。でも核スピンの場合は、さらに千倍難しいですからまだ先がありますけれども、でも電子スピンの1個読めるところまでは近くまでやってきたことは間違いないということです。

(スライド)

われわれのシリコン量子コンピュータがどこまで性能がよくなるかという自慢をたくさんしたかったのですが、全部飛ばします。ナノテクノロジーのところに行きます。

(スライド)

どうやってそんな1列のものをつくるのだということをよく聞かれます。いま二つステップがありますけれども、この一行をつくるというのはわれわれの究極の目標ですが、その前に、もうちょっと簡単な方法で量子コンピュータをつくらうともしています。シリコンの場合は、111面というものをある方向に一度傾斜して研磨してやると、緑のところを見てください、階段状にきれいなシリコンの表面がつかれることがわかっています。それを実際にSTMというもので見たのがこの図ですが、シリコンが2万個一行に並んでいます。2万個一行に並んでいるところにちょっとシリコンをふらしてやると、シリコンは一行に並んでくれる。これはステップフロー成長といいますが、それをやろうではないかと。

(スライド)

こんなのは難しいのではないかとことはよく言われますが、実際にこういうことを調べている方がいて、これは実際にSTMでシリコンを降らせながら、どうやってシリコンが動くかをみている図ですが、上から、降らしてきたシリコンは、ずっとステップのところまで拡散して行って、くっついてる様子を見て、実際にくっつく様子を見ると、ちゃんとこの横のところにくっつくことが確認されています。ですからこの人たちは、まっすぐな階段をつくらなかったんです。だからわれわれとしては、まっすぐな階段をつくって、その上に原子を降らして、一行の29シリコンを並べたいということを考えているわけです。

慶応でもいろいろそういうことをやっている。

(スライド)

もう一つは、磁石をつくらなければいけません。磁石をつくって大きな磁場を加えるので、マイクロマグネットをつけて、こういうようなメサ構造をつくって、磁石を、メサ構造一つひとつというのはマグネットの下にシリコンのチェーンが入っているのですが、これを巨大、5テスラとかの磁場に入れて飽和させて、その上でこの下に大きな磁場勾配をつくるということのシュミレーションも行っていきます。

(スライド)

これは断面図のシミュレーションですが、言いたいことは、こういうような短冊状のマグネットをシリコンの上のせてやると、こちら辺の位置ではだいたい2テスラ/ミクロンという大きな磁場勾配が得られるだろうということが予測されています。ですからそれを私たちはつくろうと。これに関しては東北大の江刺研究室と一緒に共同で進めようとしているところであります。

(スライド)

最後に、本当に同位体をつくれるかということで、われわれの研究室では28シリコンとか、いろいろな同位体をつくることを行って、まとめてしまうと、これが99.92%、28シリコン、これは99.3%、29シリコン、これは99.3%の30シリコンということで、すべての3種類の同位体をつくることに成功しています。それを実際にMB装置というものに入れて原子レベルでこのシリコンを並べていこうということをするわけです。こここのところ白木先生からいろいろ教わってきたということです。

(スライド)

最近の仕事としては、まずは本当にシリコンを一面一面原子レベルでのせることをやってみようではないか。シリコンだから簡単ではないかということ、白木先生に言わせると、そう簡単じゃないぞと。いろいろつばがない。そう簡単に面成長ができるかどうかかわからないということでいろいろ教えてもらいながら試してみたのが、28シリコンと30シリコンというのを変わりばんこに原子レベルで制御してのせる実験です。これができれば、これを29に変えればいいわけです。なんで最初から29やらないかということ、28、29、30とあると、真ん中のところは非常に分離しにくい。29は非常に高いんです。だからまず練習で28、30でやって、これがうまいこといけば29にいくということです。これは超格子というものです。

もう一つおもしろいのは、ガリウム砒素、ガリウムアルミニウム砒素などの超格子では、ここからここに行くことによって電子構造も変わります。でもこれはただのシリコンですから、電子構造はほとんど変わりません。見たところただのバルクです。ただ重さだけに周期性があるということです。さらに29シリコンを入れてやると、磁気的な周期性がつけられるということで、そこら辺をうまいことつ

くってやろうというわけです。こちら辺の細かいことは省きます。

(スライド)

では、できたものをどうやって評価するかということで。透過型電子顕微鏡で見ても、ただのシリコンですから、何の違いも見えません。ただのシリコンをどうやって評価するかということで、ここを使うのが重さの違いです。二つの方法を使います。

(スライド)

一つはSIMSといって、ただ単に表面から掘って出てくる28と30の重さを数える。深さ方向、表面からどんどん深さ方向を見ていくと、青が28で赤が30シリコンです。これはいま24原子層ずつ重ねた。24個・30、24・28、これは12原子層ずつ、これは8原子層ずつ重ねた場合。この周期は見事にそのねらいどおりの周期になっているということで、きれいにそういうものが積める技術ができてきているということです。

ただこれをお見せすると、本当だったらきれいに四角になるはずではないか。だれているように見えるといわれるのですが、SIMSの場合ほんぼんイオンをぶつけて剥ぎ取っているんで、ちょっとずつミキシングが起きるのです。ただこれはミキシングのせいかどうかということを確認するために、もうちょっと違う方法でラマン分光というのをを行います。

(スライド)

これはシリコンの100方面の結晶構造で、分散関係というのは示してありますが、これを例えば4層ずつ違う重さにする。ここで新しい超構造ができると、この分散関係は、フォノンの分散関係は、折りたたまれてきます。というのは、新しい超構造4層ができて折りたたまれてくる。そしてラマン分光で見えるのは、このちょうどゼロのところのフォノンですから、赤いマルのところ新しいピークがどんどん出てくる。こういうことが予想されるわけです。

(スライド)

これはいま12層、12層で、この中の振動がどうなっているか計算できるのですが、これは私説明したいのですが、時間がないので飛ばします。

(スライド)

ポイントとしては、24層、12層、8層ずつでラマン分光をして振動の様子を見ると、全然違うスペクトルがとれるということ。このスペクトルがほんとうに12層ずつになっているか、8層ずつになっているかという計算と比較ができて、

(スライド)

その計算を比較したのがこの図です。縦軸が何層ずつ重ねたか、ですから8というのは8層ずつ、これは12層ずつ、これは24層ずつで、実践が計算結果です。かくかく

しているのは、アンチクロッシングということをしているのですが、実際にわかったピークの位置は星印であって、非常に実験と計算がよい位置を示しているということできれいな超格子ができていて、これから 29 シリコンを使っていこうということを考えているわけです。

(スライド)

そのようなことをやっています計算を進めているわけですが、まとめとしまして、これは“ジャパン・ナノ 2003”で使ったまったく同じまとめなんです、私のよく受ける質問です。

「量子コンピュータはいつできますか」

これはもうできているのですが、本当に役に立つ量子コンピュータはいつできますかといわれたら私にはわかりません。われわれのがんばりにかかっているということで、何も約束はできません。

次は「役に立ちますか」といわれるわけです。

これはできてみたらわかります。これも本当に無責任で申し訳なくて、石田先生に怒られそうなんです、レーザーというのもできてみないと本当に役に立つかわからなかったですし、逆にハードができれば、それを使って何ができるだろうかというソフトな研究も進むということで、私としては、そこら辺のところは「できてみたらわかります」ぐらいです。

では、「なぜ量子コンピュータを研究をするのですか」ということですか、やはり量子とナノテクノロジーは切っても切れない仲ということで、マテリアルサイエンスとフィジックスの融合という意味では非常に刺激的で、また将来、もしかしたら役に立つ、また世界でもやっている人がまだ少ない分野なので、突っ走れば何かいいことがあるのではないかということで、きょうのお話は終わらせていただきます。ありがとうございました。

質疑応答

○質問 量子力学の重ね合わせの原理でたくさんの演算がいっぺんに並立に行われるというのは何となく理解できるのですが、たくさん行われた演算のなかで、いま欲しい答えを欲しいというときには、どういう安定皿を選択して、検出すればいいのですか。

○伊藤 ごもっともな質問で、最後量子力学には必ず観測問題というのがありまして、先ほど 10 の 60 乗個の数もすべて並立に計算できた。でも最後一つ読み取るとしたら、そのうちの一つしか読み取れない。その瞬間にもう波束の

崩壊というか、たったそのなかの一つしか情報が得られない。そういうことに関係している質問なんです、それが量子アルゴリズムをつくるなかで一番難しいところです。ショアの素因数分解のアルゴリズムというのは、ある答えを波としてつくっておいて、それを量子フーリエ変換というものでたった一つのところに正解を読み取る確率だけは一番高いように、波を一つのエネルギーに集約する。フーリエ変換するとそうですね、一つのサイン波というのが、たった一つの波長で評価できますよね。ですから量子力学的な波をフーリエ変換して、正解を読み取る確率が 80% ということができるんです。ただ、できるんですが、そういうようなアルゴリズムを見つけるのは非常に難しいのです。だからいま、アルゴリズムが役に立つものがまだ一、二つしかできていない。とにかく観測で何とか正解だけしか読めないような確率を 100% にしたいというのが一番難しいところです。それさえできれば並列に計算して、うまいことフーリエ変換して、正解だけは読めますというふうにできればいいということです。

○松本 24 モノレイヤーですと SIMS でひかかっていますが、最終的に 29 を 1 ラインつくられたときに、SIMS ではしんどいと思うのですが、ラマンではひっかかるのですか。

○伊藤 ラマンではひっかかりますが、あともう一つそこまでいったら 29 シリコンをのせて、実際に核磁氣的に検知しなきゃいけないです。そういうふうに一原子になると評価法をどんどん変えていくということです。

○質問 実用化ということを考えたときには、固体が出ないといけないということになるのでしょうか。

○伊藤 実用化の定義にもよるのですが、例えば量子コンピュータは固体だけではなくて、いま低温ですよ。低温でしかできないわけです。そうすると皆さん、そんなのは実用にならないとおっしゃるわけですが、光でもいいわけです、固体でもなんでも。ただポイントとしては、量子コンピュータというのは輸送手段でいえばスペースシャトルみたいなもので、われわれのいま使っているラップトップのような自動車が一家に一台になることはほとんどないわけです。ただスペースシャトルみたいなものがひとつの国に一台あることになればいいかというところがまずスタートだと思います。実用化というのはそのレベルですと役に立つのではないかという気がするのですが。

(了)