



電子デバイスの将来と量子コンピュータ — 超伝導回路での挑戦

蔡 兆申

日本電気（株）基礎・環境研究所 主席研究員

本題に入る前にデジタルエレクトロニクスのお話をします。この60～70年間、1ビット当たりの消費エネルギー（E/b）はずっと下がってきています。いかに速く、いかに小さなパワーで計算するかという2つの要求を満たすには、E/bを下げなくてはなりません。「18ヵ月で集積回路の集積度が2倍になる」というムーアの法則の通り、デバイスの集積化、小型化が進んできましたが、シリコンの次世代の実用化には高いバリアがあり、今後の予測が付きません。シングルエレクトロントランジスタ（SET）、シングルフラッグスクアンタムロジック（SFQ）などのデバイスも登場していますが、集積化はこれからです。本日のテーマ、キュービット（量子ビット）はE/bはゼロで、エネルギー消費があると、デコヒーレンス（量子状態が壊れる）を起こして情報が消失してしまいます。

それでは、量子（quantum = クアンタム）コンピュータについてお話をします。

0と1を使って状態を表す古典的コンピュータロジックに対し、量子コンピュータは量子の状態で0、1を同時に表現します。現在はまだ1ビット、2ビットの単位ができたところで、集積度は古典型の100万分の1以下と比較になりません。

しかし、実効的な情報処理能力を見ると、量子コンピュータは情報量が2のN乗（N=ビット数）とエキスポネンシャルに増えていき、わずか50キュービットで2の50乗、100キュービットなら2の100乗と、非常に小規模な集積回路で膨大な量の情報を一時に扱うことができます。正確な予測は

できませんが、20～30キュービット集積すれば、現在のスーパーコンピュータを追い越すことが出来ると考えられています。

ただし、すべての処理が速くなるわけではなく、フルスケール（1000ビット以上）でスパコンを超えると予測される分野は素因数分解やデータサーチです。複雑な量子系のシミュレートはスパコンでも非常に難しく、タンパク質のシミュレートも現在のスパコンにはできませんが、量子コンピュータならできると期待されています。

実用化への課題はデコヒーレンスの防止、スクエリング、外部回路などです。科学の予測は非常に難しく、1960年代後半にIBM360が完成したとき、当時のIBM会長は「世界中で3、4台あれば十分」と考えていましたが、いまや世界はコンピュータだらけです。量子コンピュータも今は考えられていない応用ができる可能性は十分あります。

古典コンピュータのビットと量子ビットの違いを、オセロを例に大ざっぱに説明してみます。オセロの黒の駒を1、白を0と考えると、古典ビットは黒か白のどちらかです。ところが量子ビットはオセロの駒が宙に浮いて、1でも0でもない状態にあると考えることができます。実際は1と0が波のように重なりあっているのですが、位相の自由（回転）、振幅の自由（角度）の2つの自由度があります。

我々は超伝導のジョセフソン効果を利用して、1ビット、2ビットの量子コンピュータをつくっています。金属中の電子にはたくさんの軌道があるのですが、超伝導体になると、すべての電子がコンデン

スして超伝導状態になり、巨視的波動関数で表すことが可能になります。2つの超伝導体の間に薄い絶縁体を挟んだ接合部（ジョセフソン接合）に電圧をかけると、2つの異なる波動関数の位相差と比例する電流が流れる（ジョセフソン効果）ので、電流を測れば量子的な位相がわかります。つまり量子力学の情報が日常的に測れる電流に直接、表れるわけです（巨視的量子効果）。

我々が実験しているキュービットはアルミニウムの1ミクロン弱の島の中に電子を出し入れするジョセフソン接合があり、ここに高速のパルスを入れると量子ビットになります。量子コンピュータは2ビットが必要で、2ビットの操作は同じような量子

ビットをつなげて実現しています。

1ビットのコントロールと2ビットの論理ゲートを合わせると、ユニバーサルゲートが構成でき、この2つのオペレーションの組み合わせで、すべての量子コンピュータのコントロールが可能です。これは古典型のAND、ORに当たり、すでに量子コンピュータの万能ゲートに近いものができあがっているわけです。

電子素子の将来は予測できませんが、そのパシカルな解答を持っているのが量子コンピュータです。いずれにしても、大きなチャレンジが待っています。

蔡 兆申（つあい・づあおしえん）

日本電気基礎研究所主任研究員、理化学研究所フロンティア研究システム巨視的量子コヒーレンス研究チームチームリーダー。理学博士。1952年生まれ。カリフォルニア大学バークレー校物理学科卒業、ニューヨーク州立大ストーニーブルック校物理学部博士。83年日本電気入社。ジョセフソン効果、超伝導デバイスと単一電子素子、超伝導量子ビットの研究を携わってきた。1999年に世界ではじめて固体素子量子ビットの制御に成功し、2003年には固体素子2量子ビット系で絡み合いを初めて作る事に成功した。2004年仁科記念賞受賞。アメリカ物理学会フェロー。