

量子コンピューターにはいくつかの手法が提案されているが、最も進んでいるのが超伝導方式だ。現在のコンピューター同様、量子コンピューターも量子ビットの集積化が必要だが、周囲の温度や磁気などの影響を受けない入出力配線が大きな課題となっていた。東京理科大学大学院理学研究科の蔡兆申教授は、平面上に素子を並べて配線した後、折りたたむ折り紙構造で集積化を実現する新回路を提案し、量子チップの実装に大きく貢献した。

超伝導量子

折り紙構造の新回路で集積化を目指す

蔡 兆申 Tsai Jaw-Shen

東京理科大学 大学院理学研究科 教授
2016～21年度CREST研究代表者世界初の超伝導量子ビット実験
電子の自在な行き来を発見

米Googleが2019年にスーパーコンピューターで1万年かかる問題を200秒で解いたと発表し、一気に注目度が高まった量子コンピューターだが、CRESTで「超伝導人工原子を使った光子ベースの量子情報処理」の研究代表者を務める東京理科大学大学院理学研究科の蔡兆申教授は、その特徴をこう説明する。「私たちが現在使っている古典コンピューターに比べ、処理速度が速い、複数の可能性を同時に導き出せる、より多くの情報を扱える、はるかに複雑な問題を解けるといった利点があります」。

この利点は、情報の扱い方に起因する。古典コンピューターでは情報を「0もしくは1」いずれかの状態とするのに対し、量子コンピューターでは「0と1の重ね合わせ」として扱

うのだ。古典コンピューターは1度に1つの情報しか扱えないが、量子コンピューターなら同時にいくつもの情報を扱えるようになり、計算も並列処理できるようになる。蔡さんもこうした量子の面白さに魅了された1人だ。

きっかけは、CREST「金属微細トンネル接合システムの物理と素子応用」(1996～2001年度)に参画し、金属などを絶対零度(-273.15度)近くまで冷却すると電気抵抗がゼロになる超伝導下で電子の振る舞いを研究していた時だった。「蛇口から水がしたたるように、電子の通るトンネルの径を細く絞って電子を1個1個流していくと、量子状態が現れたり消えたりする現象が起きました。これは面白いと思い、量子ビットに取り組むようになりました」と振り返る。

そして、1999年に当時所属していた日本電気基礎研究所の中村泰信氏(現東京大学先端科学技術研究セ

ンター教授)とともに、世界で初めて超伝導量子ビットの実験に成功したのだ(図1)。超伝導状態の2つの電極を近づけると、接合部分の電子が両電極を自在に行き来する量子状態となる「ジョセフソン効果」と呼ばれる現象が起きる。さらに、外部からマイクロ波のパルスを流すことで量子状態をコントロールしたり、読み取ったりできることを実証した。

「それまで、量子的にふるまうのは原子や分子の世界の話で、金属電極のような大きな物質が量子的なふるまいをすることは常識外のことでしたから、私たちは『巨視的量子コヒーレント状態』と呼びました」。蔡さんたちが開発した超伝導量子ビットは、扱いやすく集積もしやすい固体素子であったため、世界の研究者も超伝導回路方式の量子コンピューター開発を目指すようになった。当時の超伝導量子ビットは不安定で、量子状態を維持するコヒーレント時

間がナノ(ナノは10億分の1)秒レベルだったが、現在では実用に耐えるミリ秒単位近くにまで伸びており、冒頭のGoogleの成果にもつながっている。

発想の転換から生まれた新回路 10量子ビットでの実証にも成功

現在、量子コンピューターは大きく2つに分けられる。1つは組み合わせ最適化問題に特化した量子アニーリング方式、もう1つは古典コンピューターがAND、OR、NOTといったゲートを用いるのと同じように、量子でも計算回路を作って問題を解く量子ゲート方式だ。蔡さんたちが取り組む超伝導方式は、量子ゲート方式の中の1つで、他にも常温で動作する光量子やイオントラップなどの手法がある。商用化ではアニーリング方式が先行するが、ゲート方式は汎用性に優れているため、実用化への期待が高い。

超伝導回路方式における大きな課題は、量子ビットの集積化だ。現在までに開発された超伝導回路方式の量子コンピューターは、100量子ビット程度に留まっている。現行のコンピューターのCPUでも1チップに億単位の素子が集積されていることを考えると、量子コンピューターの集積

度はまだまだ初期段階に過ぎない。

しかも、量子ビットの特性として、周囲の温度や磁気などの影響によりエラーが起こりやすい。そこで、複数の量子ビットが連携して、計算途中の誤りをその都度訂正しながら計算することになる。そのため、高精度の計算を行うには、少なくとも1000量子ビットほどを集積する必要がある。その際に問題となるのが配線だ。

超伝導回路では、平面格子状に量子ビットを配置するが、各量子ビットに制御信号を送り、計算結果の信号を読み取る配線が必要となる。100量子ビットなら10×10の格子だから、垂直方向からでもなんとか配線できるだろう。しかし、900量子ビットとなれば30×30、1万なら100×100への配線を考えねばならない。「外縁部の量子ビットは容易に配線できますが、中心部にある量子ビットの配線がどんどん難しくなるばかりか、配線の影響でエラーも起きやすくなります。そこで、発想を転換し、新しい配線技術を考えました」と蔡さんは課題と解決へのアプローチを説明する。

具体的には、量子ビットの平面格子を折り紙や屏風のように折り畳むことで、全ての量子ビットを外側に出すという着想だ(図2)。これにより配線が容易になるだけでなく、配線

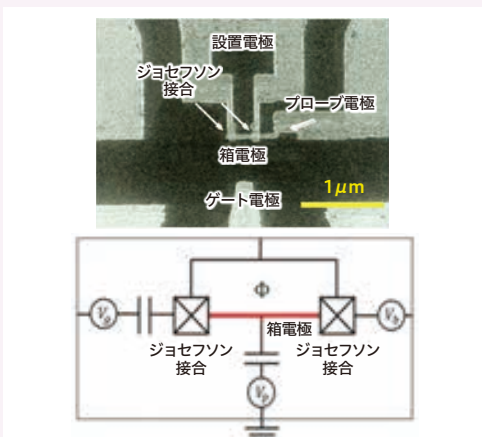
間の混信や損失が低減されるので論理量子ビットの信頼性も向上するという。最大の難関は、折り畳むことで一部の量子ビットをつなぐ配線に交差が生じることだったが、マイクロ波装置などに使われている局所的な立体構造により配線をまたぐ技術を適用することでクリアした。

研究チームは、この新回路方式を実証するため10量子ビットの超伝導回路を実際に試作して検証し、現状の技術を用いても十分に実現可能であることを確かめようとしている。「理論的には、忠実度の高い誤り訂正を行うのに必要な900量子ビット程度まで配線が可能です。そして、900量子ビットを1スロットとして、複数のスロットを連携させることで、1万量子ビット、100万量子ビットの超伝導量子コンピューターも可能になります」と蔡さんは語る。

もちろん、超伝導量子ビットの大規模集積化には、配線だけでなくさまざまな課題がある。それらの課題解決には量子力学、ナノテクノロジー、極低温、マイクロ波のエンジニアリング、低雑音測定といった最先端の技術を集結させる必要がある。蔡さんはそうした異分野との連携も視野に、次なる課題克服へと歩みを進める。

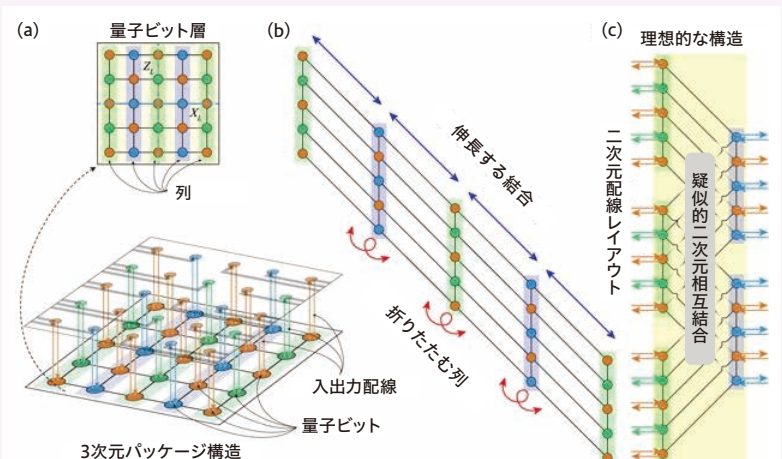
(TEXT:森部信次、PHOTO:石原秀樹)

図1 1999年に開発された超伝導量子ビットの走査電子顕微鏡(SEM)画像と回路図



世界初の超伝導量子ビットは、従来の半導体加工技術を応用し、超伝導-絶縁体-超伝導(SIS)ジョセフソン接合により作製された。

図2 超伝導量子コンピューターの新規回路方式



平面上に並べた量子ビットの配線(a)を(b)のように長く伸ばす。次に量子ビットの各列で、折り紙のように順々に折り返していく。すると(c)のように、量子ビットの列が回路の外側に並ぶ配置となる。