

量子コンピューターでは計測や計算中にエラーが生じやすいため、これをいかに解決するかが大きな課題の1つとなっている。これに対し、理化学研究所量子機能システム研究グループの樽茶清悟グループディレクターは、シリコン量子ドット中に閉じ込めた2つの電子スピンを誤り訂正が可能な高い精度で自在に操作することに世界で初めて成功した。これにより、長年培われてきた半導体技術を生かした、半導体量子コンピューターの実現への道を拓いた。

半導体量子

2つの電子スピンを自在に操作

樽茶 清悟 Tarucha Seigo

理化学研究所 創発物性科学研究センター 副センター長・
量子機能システム研究グループ グループディレクター
2016~21年度よりCREST研究代表者

装置故障から思わぬ成果に 世界初の「人工原子」を作製

量子コンピューターの開発では、超伝導回路方式やイオントラップ方式が先行しているが、現行のコンピューターの論理素子やメモリなどに利用されている半導体技術を活用した高集積な量子コンピューターを実現しようというのが半導体方式だ。CREST「スピン量子計算の基盤技術開発」の研究代表者を務める理化学研究所量子機能システム研究グループの樽茶清悟グループディレクターは、1996年に円盤状の回転対称性を持つ微小な量子ドットを世界で初めて作製し、これをきっかけにして半導体スピン量子コンピューターの研究をリードしてきた。

学生時代から半導体の光物性を研究してきた樽茶さんは、日本電信電話公社(現NTT)の武蔵野通信研究所で光通信の要となる光導波路や量子井戸レーザーとも呼ばれる2次元半導体レーザーなどの研究を行ってきた。その後、電子は1個でも波の性質があることに注目し、最小単位の情報デバイスとなる量子ドットの研究を開始した。「電子はスピンといって、磁石のような性質を持っています。上向きと下向きの2種類の状態があり、この上向き下向きの状態を『0』『1』の情報単位とするのが半導体スピン量子ドットです」と説明する。

樽茶さんは、半導体レーザー開発で培った量子井戸技術を使って薄膜の層に電子を閉じ込めることで、原子と同じ構造を持つ半導体スピン量

子ドット(人工原子)の作製に世界で初めて成功した。「実は全く違う研究をしようとしたオランダのデルフト工科大学に行ったのですが、装置故障で計画が白紙になったんです。そこで、空いた時間に密かに温めていたアイデアを試したところ、思わぬ特性が見つかり、人工原子の誕生につながりました」と振り返る。

さらに、2つの量子ドットをつなぐ人工分子の開発にも成功した。その頃、国内外で量子コンピューターの理論提案が盛んに行われるようになり、樽茶さんは人工原子や人工分子を使って量子コンピューターが実現できるのではと考えた。そのためには、量子ドットの電子の数やスピンの方向などを高精度かつ自在に制御・操作・測定することが必須とな

る。「難しいチャレンジではありませんが、なじみのある半導体技術を活用することで高集積・高速な量子コンピューターを実現できると考え、半導体スピン量子ドットに関する基礎実験を続けました」と語る。

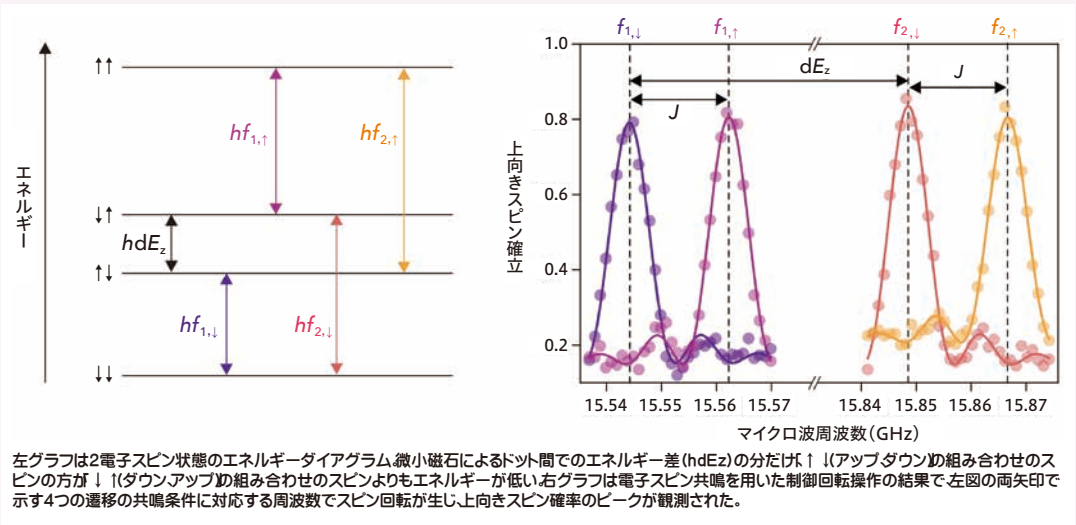
ゲート型の量子コンピューターでは、2個の量子ドットをつないだ論理

ゲートを基本とし、計算を行う。樽茶さんは人工原子1個の操作に続き、2個をつないだ2重量子ビットを作製し、高精度に操作する手法を究めていった。半導体方式は、半導体に含まれる不純物や温度などの影響を受けるため、量子情報を保持できる量子コヒーレンス時間が極めて短く、操作・測定中にエラーが起きやすいことが最大の問題であった。当初、樽茶さんは半導体レーザー研究などで使い慣れたヒ化ガリウム(GaAs)半導体基板を材料としていたが、GaAsの核スピンの影響が無視できないため、シリコン半導体へ切り換えることにした。

99パーセント以上の正確さ達成 将来は1チップに1億ビットも

CRESTではまず、シリコン材料を検討し、核スピンを持たないシリ

【図1】 単一量子ビット回転によるユニバーサルな2量子ビット操作



コン同位体(^{28}Si)の高純度結晶を基板に採用した。そのうえで、Siをシリコンゲルマニウム(SiGe)でサンドイッチした量子井戸に対して、アルミニウム微細ゲート電極から正電圧を加えることによって面内に電子を閉じ込め、かつ電子スピンを制御・操作できる量子ドットを作製した。これにより磁場雑音も低減され、量子コヒーレンス時間をマイクロ秒レベルに伸ばすことができた。

操作・測定中に生じるエラーを修正する誤り訂正においては、論理ゲートの基本である1、2量子ビットのユニバーサル操作の高精度化を進めることで、読み出し、初期化など全ての工程において99パーセント以上の正確さを達成した。これがユニバーサル操作における「誤り耐性閾値」の条件をクリアした瞬間だった

【図1】。「シリコン量子ドットにお

いて高精度で誤り訂正が可能なることを実証したことに加え、2量子ビットを用いて高い精度で量子計算が行えることも実証しました。これらの成果から、誤り耐性を有するシリコン量子コンピューターが

実現可能であることを示すことができました」と語る。

さらに、樽茶さんのグループは新たな量子技術としてシリコン系では初となる3重量子ビットも実現した。2つ以上の量子状態に現れる相関である量子もつれを、この3重量子ビットを使って制御する手法を開発している(図2)。さらに、隣接していない量子ドット間で量子もつれを生成し、入力した量子もつれ情報を他の量子ドットに転写する「量子テレポーテーション」の原理を実証するなど、半導体量子コンピューターに欠かせない基盤技術の開発・実証にも成功した。

「シリコン量子コンピューターは、既存の半導体集積回路技術と相性が良いことから、将来的に1チップに1億ビットを集積した大規模量子コンピューターの実現も夢ではありません。今後は、数十量子ビット規模での動作確認を目指すとともに、半導体メーカーなどとも連携しながら研究を深化させていきたいですね」と樽茶さんは展望を語る。日本は半導体微細加工技術において、世界最先端の立ち位置を築いている。今後もその基盤を生かして、シリコン量子コンピューターで世界をリードしていくことが期待される。

(TEXT: 森部信次, PHOTO: 石原秀樹)

【図2】 3重量子ビットの電子顕微鏡写真

