

固体量子情報デバイスの現状と将来展望

万能デジタル量子コンピュータの実現に向けて

阿部 英介*, 伊藤 公平**

今、量子コンピュータが熱い。つい最近まで基礎科学と思われた研究分野に、いつのまにか民間の資金が投入され、さまざまなエンジニアを巻き込んだ開発が急速に進んでいる。カナダのベンチャー企業 D-Wave Systems 社が、超伝導デバイスによる量子アニーラを開発し、Lockheed Martin 社や NASA-Google 社のコンソーシアムへ販売したことはよく知られているし、D-

Wave 社以外のベンチャー企業も次々出現している。さらに、米国では Google, IBM, Intel, Microsoft といった IT、半導体産業のメジャー各社が量子コンピュータ開発に本腰を入れ始めた。本稿では、量子コンピュータの究極の目標である万能デジタル量子コンピュータ研究を主題としてその現状を概観し、将来を展望する。

1. まえがき

超伝導量子ビットを用いた量子コンピュータ研究の世界的リーダーである J. Martinis は、2015 年 2 月の講演で、1985 年に参加した学会のことを回想している¹⁾。当時、全くの無自覚ながら超伝導量子ビットへつながる研究（後述）に足を踏み入れていた Martinis は、招待講演をした R. Feynman が量子コンピュータのアイデアについて語るのを聞いたものの、何を言っているのかさっぱりわからなかったという。30 年の時を経た現在、量子情報科学は極めて多様な広がりをもつ学問へ発展し、一時は夢のまた夢と思われた量子コンピュータ研究は、超伝導、半導体、イオントラップ²⁾、冷却原子^{3,4)}、光^{5,6)}などの系で、民間資金まで投入される開発フェーズに移行しつつある。

本稿のタイトルは「固体量子情報デバイスの現状と将来展望」であるが、そもそも量子情報デバイスとは何か。ひと言でいえば、「量子力学に特有の原理（状態の重ね合わせや量子もつれ）をリソースとして活用することで、それらなしでは原理的に不可能なタスクを行うデバイス」となる。このように定義しても、今やその応用範囲は、量子計算^{7~10)}、量子通信^{11~13)}、量子中継^{14~18)}、量子標準^{19~21)}、量子計測・センシング^{22~27)}と多彩である（分野の全体像は、文献 28 を参照のこと）。この中で、固体デバイスの活躍が最も期待されている分野が量子計算であることは、現在のコンピュータが固体デバイス（シリコン CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)）で作られていることから明らかだろう。ところが、量子計算に限っても、現在では万能デジタル量子計算（いわゆるゲートモデルによる量子計算）、アナログ量子シミュレーション²⁹⁾、量子アニーリング³⁰⁾といった方式が林立しており、全てをカバーすることは容易ではない。本稿では、

副題にあるとおり、万能デジタル量子コンピュータの開発状況に限って論じるが、その理由は単にトピックを絞るということではなく、その“万能”という単語のもつ意味にある。

ここで言う万能とは、「ほかの量子系で実現された量子計算方式や量子アルゴリズムを任意の精度で再現できる」ということである。アナログ量子シミュレーションや量子アニーリングが特定のタスクに特化したデバイスとなるのに対して、万能デジタル量子コンピュータは、それ「も」できる“何でも屋”なのである。もちろん、人間が作るデバイスが、実際にそのような万能性を獲得しうるかは全く非自明であり、現在のすばらしい研究の進展を目の当たりにしても、全く楽観視はできない。それを理解したうえで、万能デジタル量子コンピュータ（以下、量子コンピュータ）という究極の目標に立ち向かう先端研究の現場を伝えるのが本稿のねらいである。

2. エラー耐性量子コンピュータへの道

量子コンピュータは、計算単位として量子 2 準位系（量子ビット^{†1)}）を用い、重ね合わせ ($\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$) や量子もつれ（例えば、 $(|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$ ）という量子系に固有の状態を計算に活用する。量子コンピュータ実現に向けた困難もまさにこの点、量子状態を量子状態のまま保持する（量子コヒーレンス^{†2)}を保つ）ことの難しさにある。幸いにして、原理的には量子コヒーレンスを永続させる方法があることがわかっており、量子エラー訂正 (Quantum Error Correction: QEC) と呼ばれている。QEC にはいくつかの方式があるが、基本的なアイデアは古典のエラー訂正と同様に、1 つの量子ビット（しばしば物理ビットと呼ばれる）の量子情報を、複数の量子ビットからなる論理ビットに埋め込むことにある（3.4 節で具体例を述

* 慶應義塾大学 スピントロニクス研究センター 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1.

分類番号 12.6, 4.4

** 慶應義塾大学 理工学部物理情報工学科 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1.

e-mail: kitoh@appi.keio.ac.jp

Current status and future prospects for solid-state quantum information device development to realize digital universal quantum computing.

Eisuke ABE* and Kohei ITOH**.

* Spintronics Research Center, Keio University (3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522)

** Department of Applied Physics and Physico-Informatics, Keio University (3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522)

べる)。QECを逐次実行しながら量子計算を行うことができる量子コンピュータは、エラー耐性を備えている (fault-tolerant) と呼ばれる。エラー耐性量子コンピュータに至る開発の道筋を、図1に示す³¹⁾。研究が最も進んでいる超伝導とイオントラップの系では、複数の量子ビットによって論理ビットを構成し、その論理ビットの寿命 (T_1)、コヒーレンス時間 (T_2) を、もともとの構成要素の $T_{1,2}$ よりも長くするという、第4段階の研究開発が進行している。

一般に、系がエラー耐性を獲得するのに許容されるエラー率と、1論理ビットを構成するのに必要な物理ビット数にはトレードオフがある。例えば、表面符号 (surface code) と呼ばれる QEC 方式では、エラー率 1% でも QEC が可能であるが、その場合には 1 論理ビット当たり 10^4 個の物理ビットが必要となる。一方、エラー率を 0.001% に抑えることができれば、1 論理ビット当たり 170 個の物理ビットで済む³²⁾。したがって、技術開発が図1の上層へ進んでも、下層の基礎技術の精度を高めていく研究も同様に重要となる。

では、実際に意味のある (古典コンピュータを凌駕する) タスクを行うのに必要な論理ビット数は、どの程度か。現在の素因数分解の世界記録は、RSA-768 (768 ビット、 $\sim 10^{232}$) を演算ステップ 10^{20} 回、2年間かけて実行したものである³³⁾。一方、768 ビットの素因数分解をエラー耐性量子コンピュータで実行するためには、論理ビット 1154 個、論理ビットの演算ステップ 10^6 回程度が必要となる^{34~36)}。すなわち、論理ビット演算のクロック周波数が 1 Hz (この間に相当数の物理ビット演算が行われる) でも、半月足らずで RSA-768 の素因数分解が可能となる。

固体デバイスで量子計算を行う際にまず問題となるのは、コヒーレンスである。真空中に保持された原子・イオン系と異なり、固体は相互作用の宝庫であり、その大半がデコヒーレンスを誘発する。この点で、外界との相互作用が弱く、バルク材料でもともとコヒーレンス時間が長いことが知られていた半導体中のスピンを用いることは自然な発想である。一方、量子2準位系そのものを人間がデザインする超伝導デバイスでは、良質のコヒーレンスを得られる保証は全くなかった。以下では、超伝導量子ビットとシリコンスピン量子ビットを取り上げ、

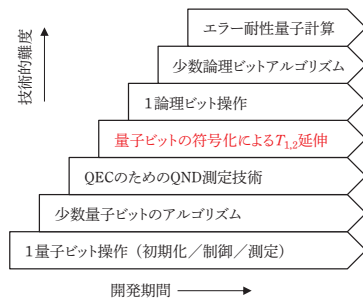


図1 7段階の量子コンピュータ開発の道筋³¹⁾。

いかにして多くの困難が乗り越えられたか、そして今後乗り越えるべき困難は何かについて解説する。

3. 超伝導量子ビットの開発状況

超伝導量子ビットは、近年、あらゆる量子系の中でも最も劇的な進展を遂げ、量子コンピュータ研究の最前線に位置している。その研究の歩みは、おおまかに3つのフェーズに分けることができる。2003年頃までは、超伝導量子ビットの開発期で、電荷・位相・磁束という異なる自由度を用いて、タイプの異なる複数の超伝導量子ビットが開発された。2004年に導入された回路量子電磁力学^{†3} (Circuit Quantum Electrodynamics: 回路 QED) のアイデアにより、マイクロ波光子を用いた量子光学実験や、2~4量子ビット系の高精度制御が実現し、多量子ビット化に向けた礎が築かれた。原子・イオン系に追いつき、ある面では追い抜いた、基礎研究の発展期といえる。そして2014年、米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校 (UCSB) の Martinis グループは、直列結合の5量子ビットデバイスにおいて、1量子ビットゲートの忠実度 (fidelity) 99.92%, 2量子ビットゲートの忠実度 99.4%, 測定忠実度 99% を達成したことを報告した³⁷⁾。これらの値は、表面符号 QEC によって、系がエラー耐性をもつために必要とされる忠実度 99% を上回っており、このまま系をスケールアップできれば、エラー耐性を備えた量子コンピュータが実現することを意味する。もちろん、実際に系をスケールアップするには、まだまださまざまな困難が待ち構えているが、多くの研究

^{†1} 量子ビット 古典計算では、データの単位として0と1の2値 (ビット) を用いるのに対し、量子計算では、量子力学的な2準位 $|0\rangle$, $|1\rangle$ にデータ (量子情報) を格納するため、この量子2準位系を量子ビットと呼ぶ。量子ビットの状態としては、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の重ね合わせ状態 $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ をとることができる (α と β は、 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ を満たす複素数)。スピン 1/2 の上向きスピン状態 $|1\rangle$, 下向きスピン状態 $|0\rangle$ は、“天然”の量子ビットである。一方、原子、イオン、超伝導デバイスなどでは、エネルギーベクトルは2つ以上の準位からなることがほとんどである。その場合でも、適切な2準位を選び出すことで (多くの場合、基底状態と第1励起状態)、実効的な量子2準位系を構成できる。このような有効2準位系を擬スピンと呼ぶこともある。

^{†2} 量子コヒーレンス 量子ビットを基底状態 $|0\rangle$ と、それよりエネルギーの高い状態 $|1\rangle$ から構成した場合、 $|1\rangle$ 状態は、時間がたつとエネルギーを放出して $|0\rangle$ 状態へと緩和する。この時定数を、量子ビットの寿命、緩和時間、 T_1 などと呼ぶ。一方、重ね合わせ状態 $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ は、“0”であり、かつ1で

もある”という量子系に特有の状態 (量子コヒーレンスのある状態) であるが、時間とともに、“0 または 1” という古典状態へと変わる (より正確には、状態の密度行列の非対角成分が失われる)。量子状態が“古典化”する過程をデコヒーレンスと呼び、その時定数をコヒーレンス時間、 T_2 などと呼ぶ。実験的に T_2 を決定するためには、測定ごとの不均一性を取り除くためにスピンエコー法と呼ばれる技術を用いる。共鳴線幅から見積もられる T_2 は不均一性を含んでいるため、 T_2^* としてスピンエコー法で得られた T_2 と区別することが多い。この場合、 T_2^* は T_2 の下限値と見なされる。

^{†3} 量子電磁力学 電磁気相互作用を記述する場の量子論。量子電気力学とも呼ばれる。その最も単純化された例は、原子の2準位系と単一の電磁波モードからなる系である。高 Q の共振器内に原子と電磁波を閉じ込めることでこの系を実現し、原子-光子相互作用の過程を詳細に調べる研究分野が、共振器量子電磁力学である。

者が抱いていた、量子コンピュータの実現性に対する心理的バリアを取り除いたといえる。これは、資金を提供する側にとっても同様であったようで、同年に IT の巨人 Google 社が、Martinis のグループごと雇用して研究を支援することを発表した。こうして現在は、数十～百量子ビットの中規模量子コンピュータ実現に向けた研究が本格化した第 3 期を迎えている。

本章では、まず、超伝導量子ビットの基礎について解説し、第 1, 2 期の研究を振り返る。その後、現在の第 3 期の研究動向について解説する。

3.1 基礎知識

超伝導デバイスにおいては、ジョセフソン接合に付随する異なる自由度を用いることで、電荷量子ビット、位相量子ビット、磁束量子ビットと呼ばれる、性質の異なる量子ビットを実現できる。後述するトランズモン (transmon) は、電荷量子ビットの亜種である。ジョセフソン接合は、超伝導体を極薄の絶縁体で隔てた構造であり、電気回路的には、無散逸の非線形インダクタと、キャパシタの並列回路として機能する。通常の (線形) LC 回路のハミルトニアンを考えると、

$$H = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L} \quad (1)$$

となる。\$Q\$ はキャパシタにたまる電荷、\$\Phi\$ はインダクタのコイルを貫く磁束である。式(1)は、運動量 \$p\$、位置 \$x\$ をもつ調和振動子の系のハミルトニアン (\$H = p^2/2m + kx^2/2\$) と同じ形をしているから、LC 回路を“量子化”するには、\$Q\$ と \$\Phi\$ を共役演算子と見なして、交換関係 \$[\hat{Q}, \hat{\Phi}] = i\hbar\$ を課せばよい (詳細は文献 38 を参照のこと)。調和振動子の場合と同様に、等間隔のエネルギー準位構造が得られる。

準位が等間隔では、周波数による遷移の識別ができないので、量子ビットとして用いるには都合が悪い。そこで、ジョセフソン接合の非線形性を導入する。それには、式(1)の第 2 項を \$-E_J \cos(2e\Phi/\hbar)\$ と置き換える (より詳細な議論と、\$\Phi\$ と超伝導の位相との関係などは、例えば文献 39 を参照のこと)。\$E_J\$ はジョセフソンエネルギーと呼ばれる。コサインの \$\Phi^4\$ 以上の項が非調和ポテンシャルを生み、マイナス符号により、高エネルギーになるほど準位間隔が狭くなる。これにより、最低エネルギー状態 \$|0\rangle\$ と第 1 励起状態 \$|1\rangle\$ の間の遷移のみに周波数識別してアクセスすることが可能となり、量子ビットとして活用することができる。

\$E_J\$ は \$\Phi\$ に付随するエネルギーであるが、\$Q\$、すなわち式(1)の第 1 項に付随するエネルギーは、帯電エネルギー \$E_C\$ である。ただし、\$E_C\$ の計算には、接合のキャパシタンスだけでなく、ゲート電極やグラウンドとの間にできるキャパシタンスも含めた、系全体のキャパシタンスを用いる。すると、超伝導量子ビットは \$E_J\$ と \$E_C\$ の比によって分類できる。\$E_J/E_C\$ が 1 以下では、帯電効果が支配的であり、電荷量子ビットと呼ばれる。一方、\$E_J\$ が支配的となるデバイスは、位相量子ビットと呼ばれ、\$E_J/E_C\$ は \$10^4\$ 程度になっている。磁束量子ビットを実現するには、SQUID (Superconducting Quantum Inter-

ference Device) のループ構造を導入する。ループの右回りと左回りの電流が、向きの異なる磁束の状態を生むので、量子ビットとして用いることができる。磁束量子ビットにおける \$E_J/E_C\$ は数十程度であり、電荷量子ビットと位相量子ビットの中間の値となるが、「右回りと左回りの電流の重ね合わせ状態」が実現すると考えれば、巨視的量子性という点では、最も劇的なものである。

ここまでの議論は、超伝導量子ビットの解説の定番の導入部であるが、無論、電気回路の量子化とそのエネルギー構造の離散化、右回りと左回りの電流の重ね合わせといった概念が、はじめから受け入れられていたわけではない。むしろ、こうした概念への実験的な答えを見いだす研究こそが、超伝導量子ビットの実現につながっていったのである。

3.2 第 1 期：量子ビット開発

SQUID ループの右回りと左回りの電流の間に、量子力学的な重ね合わせ状態が可能か、という問いを定式化したのは、米国イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校の A. Leggett である⁴⁰。1980 年代の超伝導メゾスコピック系の研究水準は、この問いに答えるところまで成熟してはいなかったものの、研究者たちはその前段階として理解されるべき、巨視的変数の量子性、それによって形成される離散エネルギー準位の存在、その準位における巨視的量子トンネル現象の観測といった課題に取り組んでいった。

1985 年、カリフォルニア大学バークレー校 J. Clarke グループの大学院生であった Martinis は、ポスドクの M. Devoret とともに、マイクロ波分光を用いて、電流バイアスされたジョセフソン接合 (いわゆる洗濯板ポテンシャルをもつ) におけるエネルギー準位の離散化を確認した⁴¹。このことは、ジョセフソン接合で隔てられた超伝導体の間の位相差という巨視的変数が量子性をもつことを意味し、また今日的な視点からは、位相量子ビットの元祖と見なすこともできる。その後、Devoret は母国フランスに戻り、同時期に Clarke グループに在籍していた D. Esteve, C. Urbina とともに、超伝導量子エレクトロニクス (彼らは “Quantronics” と呼んでいる) グループをサクラ研究所に立ち上げ、同分野の世界的リーダーとなった。Martinis は、Quantronics グループのポスドクを経て米国立標準技術研究所 (NIST) に移り、やはり同分野の研究を続けた。

1990 年代に入ると、微細加工技術と薄膜作製技術はさらに進歩し、大きな \$E_C\$ を有する極微小な単電子トランジスタ (Single Electron Transistor: SET) の作製が可能となった。このような超伝導 SET はクーパー対箱とも呼ばれ、ゲート電圧を調節することで、内部の余剰クーパー対の数 \$N\$ を制御できる。さらには、余剰電荷 \$N(2e)\$ と \$(N+1)(2e)\$ の状態が、エネルギー的に縮退するようにゲート電圧を設定することもできる。系が量子力学に従うのであれば、このときの 2 状態は、結合・反結合状態を形成して縮退が解ける (エネルギー差 \$E_J\$ の準位反交差) はずである。1997 年、日本電気 (株) (NEC) 基礎研究所の中村泰信、蔡兆申らは、この「電荷

の重ね合わせによるエネルギー分裂」を、マイクロ波分光により確認した⁴²⁾。これは、1985年の実験の電荷版に対応する。さらに1999年、NECグループは電圧パルスを用いて、電荷の結合・反結合状態間のコヒーレント振動を観測した⁴³⁾。真の意味での超伝導量子ビット（電荷量子ビット）の誕生であり、その後の研究の火付け役となった記念碑的な実験である。

しかしながら、この時点での量子ビットの T_2 は 1 ns 程度であり、その後 10 年の研究は、デコヒーレンス要因の解明、デコヒーレンスを抑制するマイクロ波パルス技術（エコー法やダイナミカルデカップリング）、ノイズに対して頑強な量子ビットの設計とその実現が大きなテーマとなる（図 2）。電荷量子ビットに対しては、NECグループにより、ラビ振動の観測⁴⁴⁾、電荷エコーによるコヒーレンスの延伸 ($T_2=3$ ns)⁴⁵⁾ などが行われた。

この研究に触発された Martinis らは、改めて位相量子ビットをデザインし、2002年、そのラビ振動を報告した⁴⁶⁾ (Martinis は 2004 年に UCSB に移籍)。同年、Quantronics グループは、電荷量子ビットと位相量子ビットの中間 ($E_J/E_C \sim 5$) の性質をもつ “Quantonium デバイス” を開発し、さらに、ノイズに対して頑強な最適動作点と呼ばれる動作条件を用いることで、 $T_1=1.8$ μ s, $T_2=500$ ns を達成した⁴⁷⁾。固体系は、原子系と比べてはるかに複雑でダーティであり、デコヒーレンス要因を突き止めることは容易ではない。一方、系の適切なデザインによってコヒーレンス特性を劇的に改善できることは、デバイス設計の自由度が高い固体系ならではといえる。2003年には、オランダ・デルフト工科大学 (TU Delft) の H. Mooij グループによって、SQUID ループ構造を用いた磁束量子ビットのコヒーレント制御が報告された⁴⁸⁾。

こうして、基本的な超伝導量子ビットが出そろったが、得られた T_2 は、位相量子ビットで 10 ns, 磁束量子ビットで 30 ns 程度であった。また、その時点で実現していた 2 量子ビットデバイスの構造^{49,50)} をそのまま 3 量子ビット以上へ拡張することには、大きな困難が横たわっていることは明らかであった。

3.3 第 2 期：回路 QED

超伝導量子ビット研究の第 2 期の幕開けとなる革新は、2004年に訪れる。米国イェール大学の R. Schoelkopf グループは、超伝導量子ビットを原子、コプレーナ線路共振器を空洞共振器に対応させ、系を精緻に設計することで、原子物理における共振器 QED のエレクトロニクス版、回路 QED を行うことを提案し⁵¹⁾、単一電荷量子ビットと単一マイクロ波光子の強結合状態を実現してみせた⁵²⁾。強結合状態とは、原子-光子相互作用定数 g が、原子と共振器光子のデコヒーレンスレート γ, κ のいずれよりも十分大きい状態 ($g^2 \gg \gamma, \kappa$) を指す。原子系では、その実現に最先端の技術と多大な労力を要する強結合状態が、巨大な電気双極子モーメントをもつ超伝導量子ビットでならばあっさり実現できることは、コロンブスの卵ではあるが見事というほかない。

Schoelkopf は、米国航空宇宙局 (NASA) ゴダード宇宙飛行センターで電子工学・低温技術者として勤務した経歴もあ

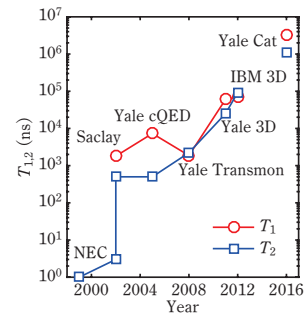


図 2 電荷量子ビットの $T_{1,2}$ の変遷。 T_2 と T_2^* を区別しない。横軸は論文の出版年。“Yale Cat” は共振器光子に対する結果。NEC^{43,45)}, Saclay⁴⁷⁾, Yale cQED⁶³⁾, Yale Transmon⁶⁵⁾, Yale 3D⁶⁸⁾, IBM 3D⁷⁰⁾, Yale Cat⁶⁹⁾。

る実験物理学者である。1998年に Schoelkopf らによって開発されたラジオ波 SET の技術⁵³⁾ は、現在では半導体量子ビットの高速読み出しに援用され⁵⁴⁾、量子情報実験に不可欠な技術となっている。超伝導量子ビットの研究でも、回路 QED をはじめとする多くの独創的なアイデアを提供して、分野全体に大きな貢献をしている。また、Devoret は 2002 年にイェール大へ移籍し、以来、Schoelkopf と共同研究を行っている。次節で述べる第 3 期の研究を、Schoelkopf, Martinis とともに牽引している中堅・若手 PI (Principal Investigator) の多く (スイス連邦工科大学チューリッヒ校の A. Wallraff, TU Delft の L. DiCarlo (Mooij の後任), 米国 IBM ワトソン研究所の J. Chow と J. Gambetta など) が、この第 2 期に Schoelkopf, Devoret の下で研鑽を積んでいる。

回路 QED がもたらした革新は、大きく 3 つある。第 1 に、制御性の高い系での量子光学実験が可能となった。 g, γ, κ , および量子ビットの周波数 ω_q , 共振器モード周波数 ω_r をデザインすることにより、原子系では実現できないような実験条件をも実現できる。この方面の研究を詳述するスペースはないが、重要な成果として、マイクロ波単一光子生成 (イェール大)⁵⁵⁾、単一電荷量子ビットを用いたレーザー発振 (NEC)⁵⁶⁾、光子数状態生成と任意の光子数重ね合わせ状態の“合成” (UCSB)^{57,58)}、超強結合領域 (ultrastrong, $g \sim \omega_r$) の観測 (ドイツ・ヴァルター・マイスナー研究所)⁵⁹⁾ などが挙げられる。興味のある読者は、文献 60 を参照されたい。またごく最近では、深超強結合領域 (deep ultrastrong, $g > \omega_r$) の観測まで報告されている^{61,62)}。

第 2 に、量子ビットの量子非破壊 (Quantum Nondemolition: QND) 測定⁶³⁾、共振器を介した複数量子ビットの結合⁶⁴⁾ といった量子コンピュータに重要な技術が、自然な形で実現できるようになった。量子ビットの QND 測定は、QEC のエラー検出に不可欠な最重要技術であり、以下のように実現される。量子ビット周波数が、共振器モードから離調された非共鳴条件 ($\Delta \equiv |\omega_q - \omega_r| \gg g$, 強分散領域と呼ばれる) での系の有効ハミルトニアンは

$$H = \hbar\omega_r a^\dagger a + \frac{\hbar}{2} \left(\omega_q + \frac{g^2}{\Delta} \right) \sigma_z + \hbar \frac{g^2}{\Delta} a^\dagger a \sigma_z \quad (2)$$

となる。第3項は、いわゆるACシュタルク効果に相当するが、光子数($a^\dagger a$)と量子ビット状態(σ_z)の両方に依存する形になっている。量子ビットの状態が $|0\rangle$ か $|1\rangle$ かで相互作用の符号が変わり、光子の周波数が $\omega_r \pm (g^2/\Delta)$ と変化する。これにより、光子の周波数シフトから量子ビット状態のQND測定が可能となる。重要なこととして、式(2)は光子と量子ビットに対して対称な形をしている。よって、量子ビットの周波数シフトから光子数のQND測定を行うことも可能である。また複数量子ビットの結合も、共振器と量子ビットは非共鳴の状態で行い、量子ビット間の周波数差を調節することで、仮想光子を介した量子ビット間の結合を実現している。

第3に、量子ビットのコヒーレンスが大幅に改善した。図2にあるように、第1世代の回路QEDに用いられたクーパー対箱は、すでにQuantroniumと同程度のコヒーレンスを備えている⁶³⁾。従来、超伝導量子ビットの読み出し機構は複雑になりがちであった。例えば、電荷量子ビットでは、クーパー対箱に読み出し用の高抵抗接合がつながっており、準粒子電流を測定している。磁束量子ビットでは、量子ビットのSQUIDに近接して読み出し用のSQUIDが必要となる。こうしたデバイスの複雑さが、量子ビットのコヒーレンスを制限する要因となった側面もあるだろう。回路QEDでは、基本的にはマイクロ波の入出力のみで量子ビットの制御・測定を行うことができるので、デバイス構造を簡略化でき、結果としてコヒーレンスの改善にもつながった。

さらに、回路QEDのためにイェール大グループによって開発されたトランズモン量子ビットにより、ついに(ようやく?)、 $1\mu\text{s}$ を超える T_2 が実現された($T_1=1.9\mu\text{s}$, $T_2^*=2.2\mu\text{s}$)⁶⁵⁾。トランズモンは、ジョセフソン接合を含むアイランドがコプレーナ線路の信号線とグラウンド線をシャントする構造をしており、非常に大きいキャパシタンスをもつ。 E_J/E_C はQuantroniumよりはるかに大きい、数十となり、エネルギー分散が電荷に対してほぼ平坦となるため、電荷ノイズに強い耐性を備える。トランズモンは、この後の超伝導量子ビットのスタンダードとなった。トランズモンを用いて、2量子ビット量子アルゴリズム⁶⁶⁾、3量子ビットの量子もつれ生成⁶⁷⁾などの実験が行われた。

イェール大グループは、サファイヤ基板上に作製したトランズモンを3次元空洞共振器内に配置することで、コヒーレンスのさらなる改善を行った($T_1=60\mu\text{s}$, $T_2=25\mu\text{s}$)⁶⁸⁾。この場合のトランズモンは、100nm四方程度のジョセフソン接合に対して、数百 μm サイズの超伝導薄膜のアンテナ構造となっている。また、共振器の Q 値を上げることは比較的容易なため、光子状態を量子メモリとして用いることも可能となり、1msを超える T_2 が得られている⁶⁹⁾。光子状態を量子メモリとして使うというアイデアは、光子のQND測定と合わせて、次節で述べる“猫符号(cat code)”の開発へとつながった。

IBMグループは、3次元共振器を用いたアプローチで T_1

$=70\mu\text{s}$, $T_2^*=92\mu\text{s}$ を得たが⁷⁰⁾、すぐに拡張性に優れる2次元構造に回帰し、そこでも $100\mu\text{s}$ に達する $T_{1,2}$ を達成している⁷¹⁾。

回路QEDを採用しつつ、量子ビットとしては位相量子ビットを用いていたUCSBグループは、前述の量子光学実験のほか、4量子ビットの簡易版素因数分解量子アルゴリズムを実行するなど⁷²⁾、目覚ましい成果を挙げたが、2013年についてトランズモンへ移行した。ただし、独自の改良を加え、その十字型の形状からエクスマン(Xmon)と名付けている⁷³⁾。その最大の特徴は、長いコヒーレンス時間($T_1=44\mu\text{s}$, $T_2=20\mu\text{s}$)と高い制御性(量子ビット周波数の調整機能、量子ビット間の直接結合など)、拡張性を兼ね備えた点である。設計面での改良だけではなく、超伝導薄膜の分子線エピタキシー成長を導入するなど材料科学面での改善も図っている。彼らの本気度がうかがえる。本節の冒頭に述べた直列結合の5量子ビットデバイスの成果³⁷⁾は、その直接的な帰結である。こうして、第3期の幕が上がった。

3.4 第3期：QECの実装へ向けて

第2期に、超伝導量子ビットの研究は多様な広がりを見せ、研究者人口は大きく増加した。今後も、基礎研究分野においては、興味深い成果がさまざまな研究グループによって報告されるだろう。一方、量子コンピュータ研究の視点からは、新たな研究フェーズの主眼は、QECの実装とその延長としての中規模量子コンピュータの実現である。このような真に挑戦的な道を進むとなると、設備・人材の両面で多大な投資が必要となるため、プレーヤの数は絞られてきている。

本稿を執筆している2017年1月時点では、Martinis率いるGoogle-UCSBグループ、Schoelkopf率いるイェール大グループ、DiCarlo率いるTU Delftグループ、ChowとGambetta率いるIBMグループの4グループが主要プレーヤである。ほかにも、カリフォルニア州に拠点を置くベンチャー企業のRigetti Computing社(CEOのChad Rigettiは、イェール大とIBM社で超伝導量子ビットの研究を行っていた)が、超伝導デバイスによるデジタル量子コンピュータの製品化を狙っているが、まだ具体的な成果は公表されていないので、以下では触れない。

いずれのグループもトランズモンを採用しているが、QECへのアプローチは異なる(図3)。Google-UCSBグループは、エクスマンを用いて表面符号に取り組んでいる。各エクスマンは、磁束バイアスを用いて個別に周波数を制御可能であり、量子ビット間の結合は直接的な静電結合である。9量子ビットが稼働しており、さらなる多量子ビット化を進めている。IBMグループも表面符号を採用しているが、トランズモンの周波数は固定で、量子ビット間の相互作用はコプレーナ線路共振器を介して実現する。5量子ビットが稼働しており、このデバイスをウェブ上でテストすることのできるクラウドサービスを提供している⁷⁴⁾。ユーザが量子回路をデザインすることも可能で、非IBMグループがこのサービスを利用して量子計算を行

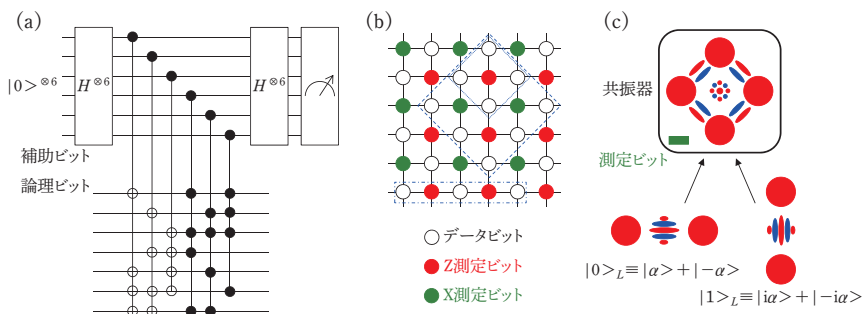


図3 QECの方式。(a)スタビライザ符号。(b)表面符号。(c)猫符号。赤と青の模様は各状態のウィグナー関数のイメージ。

い、学術論文を出版している事例もある^{75,76}。TU Delft グループは、周波数可変のトランズモンをコプレーナ線路共振器経由で相互作用させる方式を採用している。最新のデザインでは、各トランズモンに、結合用共振器×4、測定用共振器、マイクロ波ライン、周波数制御のための磁束バイアスラインと計7つの信号線がつながっており、構造としては一番複雑である⁷⁷。その星型の形状からスターモン (starmon) と呼ばれている。QEC方式としては、表面符号が念頭にあるが、小規模での実装ではスタビライザ符号も視野に入れている。最後に、イェール大グループは3次元共振器を用いて猫符号によるQECを進めており、独自路線を歩んでいる。ただし猫符号は、原理的には表面符号やほかのQEC方式との併用が可能であり、例えば、猫符号による論理ビットが忠実度99.999%を達成すれば、その論理ビット170個で表面符号用の論理ビットを構成できる。

ここで、いずれの実験も希釈冷凍機を用いた極低温環境下 (~10 mK) で行われていることを指摘しておく。系の動作周波数が5 GHz (温度換算で250 mK) 付近なので、熱揺らぎを十分に抑圧するためには、低温環境が必須である。また、デバイスサイズは比較的大きい。これも動作周波数からの要請であるが、5 GHzの電磁波の波長は真空中での6 cmであるから、そのための共振器はそれなりのサイズが必要となる。コプレーナ線路ではメアンダ形状を用いるなどして、多少コンパクトにすることができるが、それでも1量子ビット当たり0.1~1 mmのスペースを必要とする。3次元共振器はcmのオーダーである。希釈冷凍機の冷却能力・冷却スペースには限界があることから、超伝導量子ビットに対してはQECが実現できるかは別に、物理的なスケールビリティに対して疑問を呈する向きもある。

これに対して現在、冷却能力1 mW程度で冷却スペースの直径が40 cm以上の無冷媒希釈冷凍機が市販されている。これだけでも数百量子ビットの動作に支障はないと思われるが、ニュートリノ天文学の分野では、直径90 cm、高さ1 m、重量1.5 tの検出器に2700本のワイヤをつなぎ、10 mKまで冷却して、10年間連続運用するための希釈冷凍機の開発さえ進行中である⁷⁸。そのテストとして、1 m³の空間を15日間

にわたって6 mKに保持する実験がすでに行われている⁷⁹。少なくとも現在の研究フェーズで、希釈冷凍機の性能が大きな制約になることはないと思われる。

3.4.1 スタビライザ符号

古典のエラー訂正符号をベースとしたQECの方式は、スタビライザ符号として体系化されている⁸⁰。例として、図3(a)に、任意のエラーを訂正することのできるスティーン符号の量子回路を示す。7量子ビットで論理ビット $|0\rangle_L$ 、 $|1\rangle_L$ を構成し、そこに生じるビットフリップ

、位相フリップといったエラーを、別の6量子ビット (ancilla, 補助ビットと呼ばれる) を用いて“診断”する。重要なことは、量子状態そのものを読まずに、状態の組のパリティを読むことである。

簡単な例として、論理ビットを $|0\rangle_L = |000\rangle$ 、 $|1\rangle_L = |111\rangle$ と符号化することを考える。任意の量子状態は、 $|\Psi\rangle = c_0|000\rangle + c_1|111\rangle$ となる。このとき、1番めと2番めのビット対 (00または11) のパリティ、2番めと3番めのビット対 (00または11) のパリティはともに1である。一番めのビットがフリップするエラーが起きると、状態は $|\Psi\rangle = c_0|100\rangle + c_1|011\rangle$ となるが、このとき、1番めと2番めのビット対 (10または01) のパリティは-1、2番めと3番めのビット対 (00または11) のパリティは1である。このパリティチェック (シンドローム測定と呼ばれる) から、1番めのビットをフリップすれば、エラー訂正できることになる。TU Delft グループは、この例を5量子ビット系で実装 (論理ビットに3量子ビット、補助ビットに2量子ビット) して、エラー検出までを行っている⁸¹。

スティーン符号の論理ビットを構成するには、まずは7量子ビットが必要であるが、エラー耐性を上げるには、符号を入れ子にして繰り返す必要がある。その都度、必要となる量子ビット数、補助ビット数、測定回数は増大する。そうして、系がエラー耐性を獲得するために許容されるエラー率は、大ざっぱな見積もりでも 10^{-4} 程度、より詳しい解析では $10^{-5} \sim 10^{-6}$ と考えられている⁸⁰。この要請を満たすことは、現時点の超伝導量子ビットの性能からはまだ難しい。

3.4.2 表面符号

表面符号は、並進対称性を有するスタビライザ符号の一種で、エラー率として1%程度まで許容する点で魅力的である。Google-UCSBグループがこの値を達成していることはすでに述べた³⁷。表面符号では、図3(b)のように、量子ビットを2次元格子状に配置し、データビットのほかに、エラーを検出するための2種類の測定ビットをデータビットに挟んで配置する。最近接量子ビット間のゲートのみで量子計算ができる点で、固体デバイスでの実装に有利である。図3(b)の破線枠は、任意のエラー訂正が可能な論理ビットを構成するための最小

ブロックであるが、第2章で述べたように、エラー率と1論理ビットを構成するのに必要な物理ビット数にはトレードオフがある。1%のエラー率では 10^4 個もの物理ビットが必要となるが、まずは小さいブロックサイズで要素技術を確実にものにしていくことが重要である。

IBMグループは、表面符号を念頭に量子ビットを2次元的に配置しており^{82,83}、図3(b)の点線枠に相当するブロック(物理ビット $\times 4$ +測定ビット $\times 1$)で重み4のパリティ測定(ZZZZまたはXXXX)を実行している⁸⁴。ZZZZのパリティ測定を行うには、測定ビットを標的ビット、物理ビットの1つを制御ビットとする制御NOTゲートを全ての物理ビットに対して実行してから(CNOT $\times 4$)測定ビットを測定する。各物理ビットの初期状態として $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ のいずれかを与えると16通りのパターンがある($|0000\rangle$ 、 $|0001\rangle$ 、 \dots 、 $|1111\rangle$)が、各入力に対して正しいパリティが得られる確率の平均は0.701であった。XXXXと同様のパリティ測定を行うと、正しいパリティが得られる確率の平均は0.570であった。十分な値とはいえないが、今後へつながる重要な一歩である。

Google-UCSBグループのデバイスは1次元配列なので、図3(b)の一点鎖線枠の5量子ビットや、さらに横に増やした9量子ビットを実装している。1次元配列で直せるエラーはビットフリップだけであるが、Google-UCSBグループはこの場合のエラー訂正を実行している⁸⁵。この実験では、構成要素の物理ビットの T_1 は平均で20 μs であったのに対し、5量子ビットに符号化してエラー訂正を実行するとその2.7倍に、9量子ビットで8.5倍に延伸されることが確認されている。冗長性を増やすことでエラー抑圧が改善されるという結果は、これが初めてであり、極めて重要な成果である。

3.4.3 猫符号

猫符号は、共振器光子に量子状態を埋め込むというスタビライザ符号(表面符号を含む)とは異なるアプローチである。猫符号の背景にあるアイデアは、高 Q 共振器では極めて長い光子寿命を実現できるうえ、支配的な緩和過程は光子損失だけなので、光子状態を量子メモリとして用いて光子損失イベントを実時間追跡すれば、エラー検出・訂正できるであろうというものである。では、どのような光子状態を量子メモリとして使えばよいか。その答えが猫状態である。

猫状態とは、コヒーレント状態 $|\alpha\rangle$ の重ね合わせ状態のことをいい、

$$|C_{\text{cat}}^{\pm}\rangle = (|i\alpha\rangle \pm |-i\alpha\rangle) / \sqrt{2} \quad (3)$$

のような状態である(規格化因子には注意を要するが、ここでは簡単のため $1/\sqrt{2}$ とおく)。コヒーレント状態 $|\alpha\rangle$ は、直感的には、位相空間の原点にある真空状態を α だけ変位させたもので、光子の消滅演算子 a (すなわち光子損失)の固有状態である($a|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$)。したがって、猫状態は光子損失に対して $a|C_{\text{cat}}^{\pm}\rangle = (i\alpha|C_{\text{cat}}^{\mp}\rangle$ と応答する。そこで、猫状態の重ね合わせとして $|\Psi\rangle = c_0|C_{\text{cat}}^+\rangle + c_1|C_{\text{cat}}^-\rangle$ を作る

と、 $|\Psi\rangle$ は光子損失により、

$$\begin{aligned} & a^4(c_0|C_{\text{cat}}^+\rangle + c_1|C_{\text{cat}}^-\rangle) \\ & \propto a^3(c_0|C_{\text{cat}}^+\rangle + ic_1|C_{\text{cat}}^-\rangle) \propto a^2(c_0|C_{\text{cat}}^+\rangle - c_1|C_{\text{cat}}^-\rangle) \\ & \propto a(c_0|C_{\text{cat}}^+\rangle - ic_1|C_{\text{cat}}^-\rangle) \propto c_0|C_{\text{cat}}^+\rangle + c_1|C_{\text{cat}}^-\rangle \quad (4) \end{aligned}$$

と変化し、 α が十分に大きければ、光子損失1回ごとに $\{|C_{\text{cat}}^+\rangle\}$ と $\{|C_{\text{cat}}^-\rangle\}$ というパリティの異なるサブスペースの間を行き来することがわかる。つまり、量子ビットを $|0\rangle_L = |C_{\text{cat}}^+\rangle$ 、 $|1\rangle_L = |C_{\text{cat}}^-\rangle$ と符号化して、光子損失イベントを実時間で追跡し、必要に応じて共振器内に光子を戻せば、量子状態を保護することができる。光子損失イベントは、超伝導量子ビットを用いてQND測定できる。

猫符号の優れた点は、1論理ビットを構成するのに必要な物理リソースが、共振器1個だけで済む点である。その代わりに、共振器内に多数の光子を収容することで、符号化に必要な冗長性を確保している。また、最初の符号化の時点で α を十分に大きく取っておけば、光子損失のたびにエラー訂正を施さなくても4回ごとに元の状態に戻ってくる(α が小さければすぐに真空状態に近づいていくので、この限りではない)。

イェール大グループは、このスキームをエラー訂正も含めて実装し、量子状態を320 μs にわたって保持することに成功している⁸⁶。これは、系のトランズモンの寿命17 μs 、単一光子状態の寿命287 μs のいずれよりも長い。いうまでもなく、これは容易な実験ではない。エラー訂正に至るまでに、100個以上の光子のコヒーレント状態・猫状態生成⁸⁷、 $\{|C_{\text{cat}}^+\rangle\}$ と $\{|C_{\text{cat}}^-\rangle\}$ のサブスペース間の量子跳躍のQND実時間追跡⁸⁸などを行い、量子制御技術開発を積み重ねた結果である。また、QND測定にはジョセフソンパラメトリック増幅器(Josephson Parametric Amplifier: JPA)が、実時間追跡やエラー訂正には高速のフィードバック回路が必要であり、エンジニアリングの面でも非常に多くの最新技術が投入されている。

4. シリコンスピン量子ビットの開発状況

シリコンスピン量子ビットの魅力は、何よりも高度に洗練されたシリコンCMOS製造技術との親和性である。QECや量子アルゴリズムを実行するには、量子ビットの測定結果に応じて系にフィードバックを与える古典回路(CMOS集積回路)が不可欠である。量子ビット自体の作製だけでなく、周辺回路も含めて同一チップ上に作り込めることは、系をスケールアップしていく際には、大変な強みとなる。現在の開発状況は、数量子ビットの量子操作が実現している段階なので、超伝導量子ビットに追いつくだけでもまだ長い道のりであるが、10年前に超伝導量子ビット研究の現状を予想できた人がどれだけいたであろうか。シリコン量子コンピュータのもつポテンシャルは、半導体産業の盟主Intel社を動かした。2015年、Intel社は、量子コンピュータ開発に参入することを発表した。TU DelftのL. Vandersypenを中心とする量子テクノロジー研究センター(QuTech)に、10年間で5000万ドルを投資し、Si/SiGe量

子ドットによる集積型量子コンピュータの開発に取り組む。米国オレゴン州ポートランド市近郊の Intel 社試作ラインで 300 mm Si/SiGe エピウェーハと量子ドット構造を作製し、それを TU Delft グループが評価するというのが当面の計画であるが、超伝導量子ビット研究における Google-UCSB グループのケースと同様に、産学の大家タッグがどのような結果をもたらすか大変興味深い。

本章ではまず、シリコンスピン量子ビットの研究以前に、ヒ化ガリウム (GaAs) 系の量子ドットにおいてどのような研究が行われていたかを簡単に振り返り、その後、シリコン系の研究動向を解説する。現在、シリコンスピン量子ビット研究では、単一リンドナースピン、MOS 界面に形成される量子ドット中のスピン、Si/SiGe ヘテロ構造中の歪 Si 層^{ひずみ}に形成される量子ドット中のスピンを用いる 3 つのアプローチがしのぎを削っているため、これらについて順に議論する。

4.1 シリコン以前

半導体量子輸送・低次元物性の研究においては、シリコンは“ダーティ”，GaAs 系材料は“クリーン”な系と見なされてきた。整数量子ホール効果は、1980 年にシリコン MOS 反転層において発見されたが、その 2 年後に変調ドーブ *n*-AlGaAs/GaAs ヘテロ界面で分数量子ホール効果が観測されて以降は、研究の舞台は後者に移ってしまった。1978 年に変調ドーブ法が導入されてから 10 年ほどの間に、AlGaAs/GaAs 2 次元電子ガス (2DEG) の移動度は、3 桁以上向上し、1988 年には、量子ポイントコンタクト (QPC) のつくる 1 次元チャンネルにおいて、コンダクタンスの量子化が発見されている。そして 1990 年代は、0 次元系 (量子ドット) の研究が本格化する。

現在の量子コンピュータ研究に直接つながる研究は、1996 年の NTT 物性科学基礎研究所の樽茶清悟 (1998 年より東京大学。2012 年より現・(国研) 理化学研究所兼任)、TU Delft の L. Kouwenhoven (量子化コンダクタンスの発見者の 1 人) らによる、“縦型”量子ドットのエネルギースペクトルにおけるシェル構造の観測に始まる⁸⁹⁾。GaAs/AlGaAs/InGaAs/AlGaAs/GaAs の 2 重障壁トンネルダイオード構造を、ドライエッチングにより半径 100 nm 程度のピラー形状に微細加工することで、InGaAs 層に 3 次元の閉じ込めを実現した。ピラー側面に配置したゲート電極により、量子ドット内の電子数を 0 個から 1, 2, … 個と順に制御することが可能となり、フント則をはじめとする電子相関によるスピン効果が見えるようになった。1998 年には、スイス・バーゼル大学の D. Loss, IBM ワトソン研究所の D. DiVincenzo による量子ドットスピン量子コンピュータの提案⁹⁰⁾、豪州ニューサウスウェールズ大学 (UNSW) の B. Kane によるシリコンドナースピン量子コンピュータの提案⁹¹⁾ がなされ、半導体スピン量子コンピュータの可能性が喧伝されるようになる。

Loss-DiVincenzo スキームでは、2 量子ビットゲートは、近接する量子ドット間のトンネル結合を制御することによって生じる交換相互作用を用いる。縦型量子ドットの場合、トンネル結

合は障壁層 (AlGaAs) のバンドオフセットと層厚によって決まってしまうため、*in situ* での制御は容易ではない。多量子ビットへの拡張性の面でも、基板表面に微細加工したゲート電極への電圧印加により静電的に形成される“横型”量子ドットの利用が望ましい。横型量子ドットにおいて、0 個までの電子数制御が可能となったのは 2000 年のことである⁹²⁾。以降、量子ドットにおける少数電子スピンの研究は、横型量子ドットが主流となっていく。

この時期、米国スタンフォード大学/IBM アルマデン研究所で溶媒分子 NMR 量子計算の研究を行い、“ $15=5 \times 3$ ”の素因数分解量子アルゴリズムを実行⁹³⁾して名を馳せた Vandersypen が、Kouwenhoven の TU Delft グループに加わったことで、同グループにおける量子情報研究は加速する。TU Delft グループによる主な成果として、QPC 電荷計による量子ドット内電子数の非破壊測定 (2003 年)⁹⁴⁾、スピン-電荷変換による単一電子スピンのシングルショット測定 (2004 年)⁹⁵⁾、交流磁場 (磁気共鳴) による単一電子スピンのコヒーレント制御 (2006 年)⁹⁶⁾、スピン軌道相互作用と交流電場を用いた単一電子スピンのコヒーレント制御 (2007 年)⁹⁷⁾などが挙げられる。一方、樽茶グループは、縦型 2 重量子ドットにおけるパウリ閉塞の観測 (2002 年)⁹⁸⁾、マイクロマグネットの傾斜磁場と交流電場を用いた単一電子スピン共鳴 (2008 年)^{99,100)}などの成果を挙げた。

2005 年、米国ハーバード大学の J. Petta (2007 年より米国プリンストン大学)、A. Yacoby, C. Marcus (2012 年よりデンマーク・コペンハーゲン大学ニールスボーア研究所) らは、2 重量子ドットにおけるドット間交換相互作用の電圧パルスによる制御を実現して、大いに注目された¹⁰¹⁾。これは、Loss-DiVincenzo スキームにおける 2 量子ビットゲートと見ることも、2 重量子ドットのスピン 1 重項 (Singlet: S) とスピン 3 重項 (Triplet: T) 状態を量子ビットとする、ST 量子ビットのコヒーレント制御と見ることもできる。単一電子スピンのコヒーレント制御、すなわち、Loss-DiVincenzo スキームの 1 量子ビットゲートが実現したのは 2006 年だから、その時点で、任意の量子ゲートと測定を行うための要素技術はそろっていたことになる。しかしながら、そこから直ちに系をスケールアップすることにはならなかった。1, 2 量子ビットゲートの組み合わせ¹⁰²⁾、2 量子ビットゲートと各ビット独立のシングルショット測定の組み合わせ¹⁰³⁾が実現したのは、2011 年になってからである。これには技術的な難度のほかにも、GaAs 系材料自体の問題も関係している。

研究の過程で明らかになったことは、GaAs 系材料におけるスピン軌道相互作用と超微細相互作用の影響である^{104~106)}。スピン軌道相互作用は、電場による電子スピン制御を可能とする一方、スピン緩和の要因となる。超微細相互作用によって電子スピンが感じる核磁場は、ST 量子ビットの量子ゲートに利用できる¹⁰⁷⁾反面、デコヒーレンス要因となる。結果として、量子コンピュータに求められる高いゲート忠実度を実現するこ

とが難しい。いずれももろ刃の剣であるが、量子コンピュータにとっては、メリットよりもデメリットのほうがはるかに大きく、母体材料として GaAs 系材料を用いる限り逃れることができない (Al, Ga, As の全ての安定同位体が核スピンをもつ)。スピン軌道相互作用が弱く、母体核スピンを除去することが可能なシリコンの出番である。天然シリコンは 3 種類の安定同位体から構成され、その組成比は $^{28}\text{Si} : ^{29}\text{Si} : ^{30}\text{Si} = 92.2\% : 4.7\% : 3.1\%$ である。このうち ^{29}Si のみが核スピン $I=1/2$ を有するが、筆者の 1 人 (伊藤) の実践してきた半導体同位体工学により取り除くことができる¹⁰⁸⁾。バルクでは残留の ^{29}Si を 50 ppm に、エピウェーハでも 800 ppm に抑えた試料が得られている。

研究の対象が電子の電荷 (電流) からスピンの移ったとき、“ダーティ”なのは GaAs 系材料で、“クリーン”なのはシリコンなのであった。こうして、研究の舞台はシリコンへ移って (戻って?) いく。もちろん、GaAs 系量子ドットで開発されてきた量子制御技術は、シリコン量子ドットへも適用されて研究の急速な進展を支えている。GaAs 系量子ドットは、その高品質ゆえに、技術開発のテストベッドとして今後も重要な役割を果たしていくものと考えられる。

4.2 単一リンドナー量子ビット

Kane スキームでは、リン原子をシリコン表面から深さ 25 nm のところに 20 nm 間隔で 1 列に並べて集積型量子コンピュータを構築する⁹¹⁾。5 つの最外殻電子を有する V 族元素リン原子で結晶格子中のシリコン原子を置換すると、4 つの電子が共有結合に使われ、残りの 1 つの電子がリン原子核の正の電荷によるクーロン力で結合する。イオン化エネルギーは 45 meV であるため、室温では結合が切れて伝導電子となるが、10 K 以下では電子がリン原子核に束縛されて水素原子的に振る舞う (デバイス動作は、超伝導量子ビット同様 ~ 10 mK)。また、リンの安定同位体は ^{31}P のみで、核スピン $I=1/2$ を有する。したがって、シリコン中のリンは電子スピン $S=1/2$ と核スピン $I=1/2$ からなる 4 準位 (2 量子ビット) 系となる。制御性の高い電子スピンを演算に、コヒーレンス時間の長い核スピンを量子メモリに用いることで量子計算を行うというのが Kane のアイデアである。

提案直後から、豪州では Kane 量子コンピュータを実現するために、UNSW をはじめとする研究機関に多大な資金が投入されてきた。2000 年代は、この取り組みは、豪州外からは無謀な賭けと見られていたように思われる。しかし、執念は実り、2010 年に UNSW の A. Morello と A. Dzurak のグループは、単一リン電子スピンのシングルショット測定を実現する¹⁰⁹⁾。用いられた手法は、原理としては 2004 年の GaAs 系量子ドットでの実験⁹⁵⁾ と同じである。しかしながら、単一リンのイオン注入と、スピン状態測定用の SET 構造の作り込みなど、デバイス作製の難度は極めて高い。

UNSW グループはこれを皮切りに、単一リン電子スピンおよび核スピンのコヒーレント制御に立て続けに成功する^{110,111)}。電子スピンの T_2 は 206 μs で、これは天然バルクシリコンでの

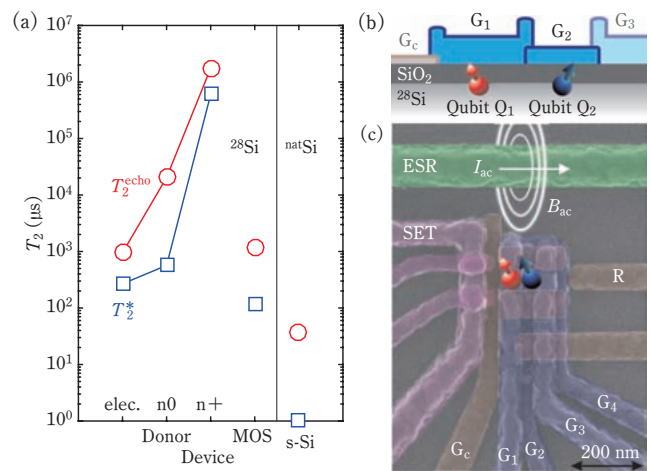


図 4 (a)シリコンスピン量子ビットの T_2 。図 2 とは縦軸のスケールが 3 桁異なることに注意。elec.: ドナー電子スピン, n0: 中性ドナー核スピン, n+: イオン化ドナー核スピン。Donor¹¹²⁾, MOS¹²⁰⁾, s-Si¹²⁵⁾。(b), (c) MOS 型 2 量子ビットデバイスの断面構造と走査型電子顕微鏡写真 (文献 121 より再掲)。

値の 2/3 程度であった。また、核スピンに対しては、中性リンで 3.5 ms、イオン化リン (リンから電子を意図的に取り除いた状態) で 60 ms という値が得られている。リンが表面から 10 nm 程度の深さに位置しているため、デコヒーレンス要因としては、 ^{29}Si 核スピンによる磁場揺らぎ以外にも、 SiO_2/Si 界面に存在する電子スピン欠陥や近接する SET のゲート配線の影響なども考えられる中、これは希望のもてる数値である。とはいえ、このように複雑なデバイスでは、 ^{29}Si 核スピン以外の要因が T_2 を制限するであろうという声も少なくなかった。これを検証すべく第 2 世代のデバイスでは、筆者の 1 人 (伊藤) が UNSW グループに提供した 4 inch 天然シリコンウェーハ上に 99.92% ^{28}Si 層を 1 μm 気相成長したエピウェーハが用いられた。結果 T_2 は、電子スピンの 950 μs 、中性リン核スピンで $T_2 = 20.4$ ms、イオン化リン核スピンで $T_2 = 1.75$ s と延伸された (図 4(a))¹¹²⁾。中性リン核スピンに対してダイナミカルデカップリングを行った場合の T_2 は、35.6 s という驚異的な値であった。この優れたコヒーレンス特性により、リンの電子スピンと核スピンの量子もつれ生成 (忠実度 96% 以上)¹¹³⁾、Kane の提案どおりに電子スピンの演算を実行し、その結果を核スピンで保持 (80 ms) する量子メモリ実験¹¹⁴⁾、電子スピンとマイクロ波光子がコヒーレントに結合したドレスト状態での実現¹¹⁵⁾ など、種々の興味深い実験が実現している。

現状のデバイス構造は、スピン制御のためのマイクロ波照射用のワイヤと読み出し用の SET が占めるスペースが大きく、仮に、単一イオン注入¹¹⁶⁾ や STM (Scanning Tunneling Microscope) リソグラフィ¹¹⁷⁾ により、ドナーを 1 列に並べることが可能であったとしても、各ドナーごとに SET を作り込むことは難しい。量子ビット数を増やすには、さらなるアイデアが必要である。回路 QED を用いて、離れた位置のドナーを結合させる方法が提案されている¹¹⁸⁾。マイクロ波に関しては、Kane のオリジナルの提案に解決策が示されている。リンド

ナー直上にゲート電極 (A ゲートと呼ばれる) を置き, 正の電圧を印加してリン電子を電極方向に引っ張る (イオン化されない程度に). リンの電子・核スピンの共鳴周波数は, リン原子位置の電子の存在確率 (超微細相互作用の大きさに比例) に依存するので, リン原子位置での電子の分布を変えることで, 共鳴周波数を変えることができる. ^{28}Si 中の電子スピン共鳴線幅は 1.8 kHz と狭いため, 共鳴周波数を線幅の 3000 倍も変調することができる. マイクロ波を一定周波数で照射し続けて, 電子スピン共鳴周波数を電氣的にチューニングして共鳴をオン・オフすることで, 電子スピンをコヒーレント制御する実験が行われている¹¹⁹⁾. この方法で得られた T_2 は, 通常磁気共鳴と遜色ない値であった. これは周波数リソースの点から極めて効率的である. マイクロ波用ワイヤを局所的に作り込まなくても, グローバルなマイクロ波照射によって, 個々のスピンを独立に制御することができる.

4.3 MOS 界面に形成される量子ドット中のスピン

シリコン中の電子有効質量は, GaAs 中のそれより大きいため, シリコンで少数電子量子ドットを実現するためには, GaAs の場合よりサイズを小さくする必要がある. UNSW グループは, 最先端の微細加工技術を用いてシリコンで必要とされる直径 30 nm 未満の量子ドットを作製し, 少数電子領域を実現した¹²⁰⁾. ここでも ^{28}Si エピウェーハが活躍し, 量子ドット中に閉じ込められた単一電子スピンに対して $T_2 = 1.2$ ms, 1 量子ビットゲート忠実度 99.6 % を記録している¹²⁰⁾. 極小の量子ドットとはいえ, リンドナーを 1 列に並べることに比べれば, 多量子ビット化の難度は緩和される. そのスタートとなる 2 量子ビットデバイスが, UNSW グループの作製した図 4 (b), (c) である¹²¹⁾. ゲート G_{1-4} により 2 重量子ドットを形成し, それぞれのドット Q_1 , Q_2 中の電子スピンを量子ビットとして用いる. Q_1 の左が読み出し用 SET である. Q_2 の右のリザーバー R (Reservoir) は, 2 つの量子ドットに電子を供給する. 上部ラインがマイクロ波照射用ワイヤである. Loss-DiVincenzo スキームに従って, 2 量子ビットゲート (1 量子ビットゲートと組み合わせた CNOT ゲート) が実現された.

ドナースピン量子ビットほどではないにせよ, 多量子ビット化に向けた課題は過小評価できない. 図 4 (b), (c) のデバイスでは, Q_1 は SET で直接読み出せるが, Q_2 のスピンを読み出すためには, まず Q_1 のスピンを SET で読み出して (すなわち Q_1 を空っぽにして), Q_2 のスピンを Q_1 , SET と順にシャトルしなければならない. この操作には, G_{1-4} の微妙なゲート電圧操作が必要となる. 一方, 現状では, 各ドットごとに読み出し用の SET を作り込むことは設計上困難であるうに, Q_1 と Q_2 の間の結合は常にオンである. 結合をオフにするには, さらに小さいゲート構造を用いなければならない.

これらの問題の解決は, プロセスも含めて CMOS 集積回路技術の知見が活用できるだろう. 応用物理・電子工学研究者との連携が欠かせない. CMOS 作製技術を取り入れるのであれば, 既存の 300 mm ウェーハプロセスラインで量子ビットが作

製できることが望ましい. そのような研究にフランス・原子力・代替エネルギー庁 (CEA) のグループが取り組んでいる¹²²⁾.

4.4 Si/SiGe ヘテロ構造中の歪 Si 層に形成される量子ドット中のスピン

MOS 界面には常磁性欠陥 (有名な P_b 中心など) が存在するので, スピン量子ビットの環境としては最適ではないかもしれない. 量子ビットの場所を MOS 界面から離れた位置にということが開発が進むのが, 界面から離れた位置にある歪 Si (s-Si) 層にスピン量子ビットを構成するアプローチである. 薄さ数 nm の Si 層を格子定数が Si より大きい SiGe 層で挟み込むと, Si 層は引っ張り応力を受けて歪 Si 層を形成する. その場合でも, 量子ドットは表面ゲートにより静電的に形成されるため, 歪 Si 層をあまり深い位置に置くことはできないが, 数十 nm であれば界面欠陥の影響を逃れながら, 直径 50 nm オーダの少数電子量子ドットを形成できる.

Si/SiGe 構造を用いたスピン量子ビット作製のブレイクスルーが, 米国 HRL 研究所が 2012 年に発表した ST 量子ビットである¹²³⁾. 従来, 歪 Si 近傍の SiGe 層に電子を供給するために n 型ドーピングが行われてきたが, その場合にはイオン化しないドーパントに束縛され続けた電子スピンの揺らぎが, ラビ振動を観測できないほどに量子ドットのコヒーレンスを劣化させていた. そこで HRL 研グループは, ドーピング層を取り除き, 試料全体を覆うグローバルゲート電極によりキャリアを誘起し, さらに局所ゲート電極を用いて歪 Si 層にトンネル結合 2 重量子ドットを形成した. GaAs 系 2 重量子ドットと同様のパルス電圧操作¹⁰¹⁾ により, ST 量子ビットのコヒーレント振動の観測に成功した. ただし, この場合のコヒーレンスは, $T_2^* = 360$ ns とまだ短かった¹²³⁾. その後, HRL 研グループは歪 Si 層を ^{28}Si に置き換え, 3 重量子ドット量子ビットを実装し, T_2^* として 6.4 μs を得ている¹²⁴⁾. 3 重量子ドット量子ビットでは, 横 1 列に並んだ 3 個の量子ドットに 1 個ずつ電子を格納し, 隣り合う量子ドットを交換相互作用で結合させる. このときの 3 電子のスピン状態のうちの 2 状態を量子ビットとして用いている.

Si/SiGe 構造の単一電子スピン量子ビットには, TU Delft グループと樽茶グループが取り組んでいる. TU Delft グループは, マイクロマグネットと振動電場を用いたスピン共鳴法によって, 天然組成試料で $T_2^* = 0.92$ μs , $T_2 = 40$ μs ¹²⁵⁾, 1 量子ビットゲート忠実度 98 % 以上を得ている¹²⁶⁾. 樽茶グループも, 天然組成試料で $T_2^* = 2$ μs を得ている¹²⁷⁾. もともとマイクロマグネット法を開発した樽茶グループだけに, マグネットデザインの最適化がなされており, ラビ振動周波数は最高 35 MHz と, TU Delft グループや UNSW グループの量子ドットにおける結果よりも 10 倍は速いスピン回転を実現している. 高速でスピンを制御できるほど T_2 時間内に実行できるゲート回数が増えるので, 量子計算に有利であることはいうまでもない. 1 量子ビットゲート忠実度 99.6 % を達成しており, デチューニングに対してラビ振動をプロットした, いわゆるシェブ

ロンパターンの実験データは、半導体スピン量子ビットとしては大変明瞭である。

量子ビットの高品質化には、やはり至²⁸Si層を用いることが有効である。筆者の1人（伊藤）と名古屋大学の宇佐美徳隆グループは共同でウェーハを作製し、それを受け取った世界のさまざまなグループがデバイス作製と測定を開始している。多量子ビット化の面では、プリンストン大グループ（Petta）がSi/SiGe構造で9個の量子ドットを1列に並べ、その向かいに読み出し用の3個の量子ドットを配置した12量子ドットデバイスを実現している¹²⁸。ドット形成条件の再現性、ドットごとの均一性に優れるうえ、 T_1 として170 msが得られている。Intel社とTU Delftグループが共同研究を進めていることはすでに述べた。プリンストン大グループのデバイスやIntel社の作製するであろうデバイスで、どこまでの量子制御が可能となるか注目される。

Intel社が量子コンピュータ研究に参入した理由は、シリコンCMOSの微細化による性能向上が難しいフェーズを迎えているためである。そこで、古典CMOSと量子ビットを同じシリコンウェーハ上で集積し、結果としてシリコンチップの性能向上を実現しようとしている。デバイスをより小さく高密度にして数の力で計算能力を高めるのではなく、計算原理そのものを革新するというパラダイムシフトへの挑戦である。また、超伝導量子ビットが成功を収めている一因は、量子コンピュータのためのデバイスは大きくてもかまわないという、ある意味の開き直りが、発想の転換へとつながったからであろう。シリコンスピン量子ビットの系でも、最先端の微細加工技術の恩恵を十分に享受しつつ、より自由な発想が求められる段階にきているように思われる。この点でも、応用物理・電子工学研究者のアイデアに期待したい。

5. むすび：展望

筆者の1人（伊藤）が量子コンピュータに関する発表を初めて聴いたのは、理研シンポジウム「極限微小構造の物理と制御(7) —材料工学から見た量子コンピューティングの可能性—」(1998年7月、菅野卓雄・青柳克信・石橋幸治主催、応用物理学会協賛)においてであった。シリコンドナースピン量子コンピュータのスキームを発表したばかりのKaneが基調講演を行った。Kaneは翌日には慶應義塾大学を訪問し、伊藤とシリコン同位体工学の可能性を議論した。偶然ではあるが、その1998年は、NECで世界初の固体量子ビットが誕生した年であり(論文発表は翌1999年)、Google社が設立された年でもある。それからおよそ20年、本稿で解説したとおり、シリコンスピン量子ビットと超伝導量子ビットの研究は大きく発展し、Google社が量子コンピュータ開発に参入するという当時は想像もつかなかったフェーズへ突入している。そのことを思えば、これからの20年を語ることは大変難しい。あまり欲張らず、今後5年ほどの間に何がなされるべきかについて、すでに述べたことのまとめと述べきれなかったことを

簡単に列挙して本稿を閉じたい。

超伝導量子ビットでは、QECの実装が主眼であることは述べたとおりだが、一方、QECを実装しない数十～百量子ビットの量子コンピュータで、古典コンピュータではできないようなタスクを実行させようという試み(図1の第2段階)が並行して進んでいる。タスク自体に有用性があるかは別として、ともかく量子の優位性(quantum supremacyと呼ばれる)を実証しようという試みである。現在のコンピュータシミュレーションでは、数十スピンの量子系の計算も困難であるから、この路線の研究から(量子シミュレーションと似た形で)有益な応用が出てくる可能性は十分にある。また、D-Wave社の行っている量子アニーリングを、コヒーレンスではるかに優れる超伝導量子ビット(D-Wave社デバイスの T_2 は100 ns程度と推定されている)で実行したら、どの程度の改善が見られるか(見られないか)をテストすることも、“量子の力とは何か”を理解する助けになるだろう¹²⁹。結局のところ、我々はいまだ“量子コンピュータはなぜ優れているか”という根本を、完全に理解してはいない。

ハードウェア面で超伝導量子ビットとシリコンスピン量子ビットに共通する課題は、多数の量子ビットを配置するアーキテクチャと量子・古典回路のインタフェースをどう設計するかである。100量子ビット程度までであれば、古典回路は全て室温下に置いて実行可能かもしれないが、そうだとすると、マイクロ波源をはじめとする電子機器群を市販品で100セットそろえるよりは、必要な機能を集約した専用機器を設計・作製するほうが現実的であろう。量子ビット測定に用いられるJPAは低温下に置かざるをえないので、1台のJPAを複数の量子ビットで共用できるようなルーティング回路があれば効率的である。

もちろん、いずれ古典回路を低温下に配置するのであれば、多量子ビットデバイスのアーキテクチャを設計する時点で古典回路のことも考慮するに越したことはない。アーキテクチャはQECの実装方法に強く依存する面があり、多くの研究グループが表面符号を念頭においている現状では、実質的には2次元配列がデフォルトとなる。すると問題は古典回路をどこに置くかだが、量子ビットと同一平面に置くか(図5(a))、量子ビットと別の層に置くかになる(図5(b))。例えば、Google-UCSBグループのアーキテクチャの拡張性は、今のところ1次元方向のみなので、表面符号の本格的実装を目指すとは、さらなる改良が求められる。この1年ほどの間に多くの研究グループがスケラブルなアーキテクチャに関してさまざまな提案を行っており^{71,77,130~133}、各グループの次期戦略が明らかになってきている。こうした提案を実装してQECを実現できるかが、次の5年間の大きな試金石となるだろう。イェール大グループも、スケラブルなアーキテクチャを提案している¹³¹が、基本的なコンセプトは図5(c)のような、同軸ケーブルでつながれた多数の空洞共振器内をマイクロ波が行き交うというものである。1つのトランズモンが動作不良を起こしてもそのトランズモンのみ交換すればよいという点で、トラン

ジスタ以前の真空管による計算機と似ていて面白い。

エラーに対して頑強な量子計算へのアプローチとして、マヨラナフェルミオンを用いたトポジカル量子計算が注目を集めていることにも触れておこう。マヨラナフェルミオンとは、反粒子が自分自身であるようなフェルミオンで、E. Majorana によって定式化された¹³⁴⁾が、現実の素粒子には見つかっていない。

凝縮系の準粒子素励起としてマヨラナ粒子を実現する系がいくつか提案されており、その1つとして有望視されているのが、s波超伝導体とスピン軌道相互作用を有する狭ギャップ半導体ナノワイヤのハイブリッド系である。2012年、Kouwenhoven 率いる TU Delft グループは、アルミニウム (Al) - アンチモン化インジウム (InSb) ナノワイヤハイブリッドデバイスで、準粒子としてのマヨラナ粒子 (マヨラナ束縛状態) に期待される、伝導度のゼロバイアスピークを初めて観測した¹³⁵⁾。最近では、Marcus 率いるコペンハーゲン大グループが、分子線エピタキシー成長による極めて高品質のアルミニウム-ヒ化インジウム (InAs) ナノワイヤハイブリッドデバイスを実現し^{136,137)}、詳細な電気伝導測定により、マヨラナ束縛状態の存在をほぼ疑いのないものとしている^{138,139)}。Microsoft 社は、トポジカル量子コンピュータを実現すべく、Kouwenhoven と Marcus を雇い入れ、TU Delft、コペンハーゲン大の各キャンパス内に自社の量子情報研究所 (Station Q) を設立した。実際にトポジカル量子計算を行うためには、2個のマヨラナ粒子の位置を交換する操作 (braiding と呼ばれる) を実現することが必須であり、この分野における今後5年間の達成目標となるだろう。

最後になるが、ソフトウェア面での課題として、表面符号を含むスタビライザ符号では、限られたセットの量子ゲート (専門的には、クリフォード群に属するゲート) しか用いることができない点がある。古典コンピュータを凌駕する計算を行うには、非クリフォード群のゲートを別に準備する必要があることが知られており (Gottesman-Knill の定理⁸⁰⁾)、そのために膨大な数の補助ビットが必要となる (この事情はマヨラナ粒子によるトポジカル量子計算でも同様である)。非クリフォード群ゲートを生成する効率のよいアルゴリズム、非クリフォード群ゲートの使用回数を最小化する量子回路設計、さらには、表面符号よりエラー許容度が高くかつ効率的な新たな QEC 方式の探索などの理論研究が極めて重要である¹⁴⁰⁾。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、ご議論をいただいた東京大学の中村泰信教授、藤井啓祐助教、沖縄科学技術大学院大学の川上恵里加博士に感謝する。本研究は、科研費基盤研究 (S) No.26220602、スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク事業、(独)日本学術振興会研究拠点形成事業により

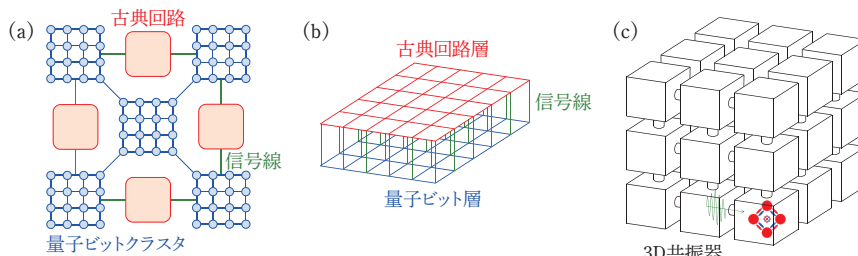


図5 量子・古典インターフェースの例。

支援された。

文献

- 1) <https://www.youtube.com/watch?v=R3UXNa37Z-4>
- 2) S. Debnath, N.M. Linke, C. Figgatt, K.A. Landsman, K. Wright, and C. Monroe: Nature **536**, 63 (2016).
- 3) 素川靖司, 高橋義朗: 応用物理 **79**, 140 (2010).
- 4) 福原武: 光学 **44**, 476 (2015).
- 5) 武田俊太郎, 古澤明: 応用物理 **83**, 444 (2014).
- 6) 武居弘樹: 応用物理 **84**, 434 (2015).
- 7) 蔡兆申: 応用物理 **78**, 3 (2009).
- 8) 山本喜久: 応用物理 **79**, 91 (2010).
- 9) 古澤明: 応用物理 **79**, 119 (2010).
- 10) 石橋幸治, ディーコンラッセル, 飛田聡: 応用物理 **84**, 428 (2015).
- 11) 長谷川俊夫: 応用物理 **79**, 104 (2010).
- 12) 佐々木雅英: 応用物理 **79**, 112 (2010).
- 13) 佐々木寿彦: 応用物理 **85**, 105 (2016).
- 14) 末宗幾夫, 笹倉弘理, 浅野泰寛, 熊野英和: 応用物理 **81**, 1029 (2012).
- 15) 早瀬潤子: 応用物理 **82**, 754 (2013).
- 16) 小坂英男: 応用物理 **83**, 928 (2014).
- 17) 末宗幾夫: 応用物理 **85**, 193 (2016).
- 18) 大岩顕: 応用物理 **85**, 769 (2016).
- 19) 香取秀俊: 応用物理 **81**, 656 (2012).
- 20) 蔡兆申: 応用物理 **82**, 592 (2013).
- 21) 金子晋久, 大江武彦: 応用物理 **83**, 356 (2014).
- 22) 山口浩司: 応用物理 **81**, 990 (2012).
- 23) 金本理奈: 応用物理 **82**, 760 (2013).
- 24) 野村政宏: 応用物理 **82**, 764 (2013).
- 25) 衛藤雄二郎, 平野琢也: 応用物理 **82**, 769 (2013).
- 26) 伊藤公平: 応用物理 **84**, 52 (2015).
- 27) 波多野睦子, 岩崎孝之, 山崎聡: 応用物理 **85**, 311 (2016).
- 28) 量子情報・物理クラスター: 応用物理 **79**, 700 (2010).
- 29) I. Buluta and F. Nori: Science **326**, 108 (2009).
- 30) 西森秀稔, 大関真之: 量子コンピュータが人工知能を加速する (日経 BP 社, 2016).
- 31) M.H. Devoret and R.J. Schoelkopf: Science **339**, 1169 (2013).
- 32) A.G. Fowler, M. Mariantoni, J.M. Martinis, and A.N. Cleland: Phys. Rev. A **86**, 032324 (2012).
- 33) T. Kleinjung, K. Aoki, J. Franke, A.K. Lenstra, E. Thomé, J.W. Bos, P. Gaudry, A. Kruppa, P.L. Montgomery, D.A. Osvik, H. Riele, A. Timofeev, and P. Zimmermann: Advances in Cryptology—CRYPTO 2010, p. 333 (Springer, 2010).
- 34) C. Zalka: arXiv:quant-ph/0601097 (2006).
- 35) N.C. Jones, R. Van Meter, A.G. Fowler, P.L. McMahon, J. Kim, T.D. Ladd, and Y. Yamamoto: Phys. Rev. X **2**, 031007 (2012).
- 36) R. Van Meter and C. Horsman: Commun. ACM **56**, 84 (2013).
- 37) R. Barends, J. Kelly, A. Megrant, A. Veitia, D. Sank, E. Jeffrey, T.C. White, J. Mutus, A.G. Fowler, B. Campbell, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, C. Neill, P.O'Malley, P. Roushan, A. Vainsencher, J. Wenner, A.N. Korotkov, A.N. Cleland, and J.M. Martinis: Nature **508**, 500 (2014).
- 38) 上田正仁: 現代量子物理学—基礎と応用— (培風館, 2004).

- 39) M.H. Devoret, A. Wallraff, and J.M. Martinis: arXiv:cond-mat/0411174 (2004).
- 40) A.J. Leggett: Prog. Theor. Phys. Supplement **69**, 80 (1980).
- 41) J.M. Martinis, M.H. Devoret, and J. Clarke: Phys. Rev. Lett. **55**, 1543 (1985).
- 42) Y. Nakamura, C.D. Chen, and J.S. Tsai: Phys. Rev. Lett. **79**, 2328 (1997).
- 43) Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J.S. Tsai: Nature **398**, 786 (1999).
- 44) Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J.S. Tsai: Phys. Rev. Lett. **87**, 246601 (2001).
- 45) Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, and J.S. Tsai: Phys. Rev. Lett. **88**, 047901 (2002).
- 46) J.M. Martinis, S. Nam, J. Aumentado, and C. Urbina: Phys. Rev. Lett. **89**, 117901 (2002).
- 47) D. Vion, A. Aassime, A. Cottet, P. Joyez, H. Pothier, C. Urbina, D. Esteve, and M.H. Devoret: Science **296**, 886 (2002).
- 48) I. Chiorescu, Y. Nakamura, C.J.P.M. Harmans, and J.E. Mooij: Science **299**, 1869 (2003).
- 49) Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, D.V. Averin, and J.S. Tsai: Nature **421**, 823 (2003).
- 50) T. Yamamoto, Yu. A. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J.S. Tsai: Nature **425**, 941 (2003).
- 51) A. Blais, R.-S. Huang, A. Wallraff, S.M. Girvin, and R.J. Schoelkopf: Phys. Rev. A **69**, 062320 (2004).
- 52) A. Wallraff, D.I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, R.-S. Huang, J. Majer, S. Kumar, S.M. Girvin, and R.J. Schoelkopf: Nature **431**, 162 (2004).
- 53) R.J. Schoelkopf, P. Wahlgren, A.A. Kozhevnikov, P. Delsing, and D.E. Prober: Science **280**, 1238 (1998).
- 54) D.J. Reilly, C.M. Marcus, M.P. Hanson, and A.C. Gossard: Appl. Phys. Lett. **91**, 162101 (2007).
- 55) A.A. Houck, D.I. Schuster, J.M. Gambetta, J.A. Schreier, B.R. Johnson, J. M. Chow, L. Frunzio, J. Majer, M.H. Devoret, S.M. Girvin, and R.J. Schoelkopf: Nature **449**, 328 (2007).
- 56) O. Astafiev, K. Inomata, A.O. Niskanen, T. Yamamoto, Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura, and J.S. Tsai: Nature **449**, 588 (2007).
- 57) M. Hofheinz, E.M. Weig, M. Ansmann, R.C. Bialczak, E. Lucero, M. Neeley, A.D. O'Connell, H. Wang, J.M. Martinis, and A.N. Cleland: Nature **454**, 310 (2008).
- 58) M. Hofheinz, H. Wang, M. Ansmann, R.C. Bialczak, E. Lucero, M. Neeley, A.D. O'Connell, D. Sank, J. Wenner, J.M. Martinis, and A.N. Cleland: Nature **459**, 546 (2009).
- 59) T. Niemczyk, F. Deppe, H. Huebl, E.P. Menzel, F. Hocke, M.J. Schwarz, J.J. Garcia-Ripoll, D. Zueco, T. Hümmer, E. Solano, A. Marx, and R. Gross: Nat. Phys. **6**, 772 (2010).
- 60) 中村泰信：固体物理 **48** (11), 63 (2013).
- 61) P. Forn-Diaz, J.J. Garcia-Ripoll, B. Peropadre, J.-L. Orgiazzi, M.A. Yurtalan, R. Belyansky, C.M. Wilson, and A. Lupascu: Nat. Phys. **13**, 39 (2017).
- 62) F. Yoshihara, T. Fuse, S. Ashhab, K. Kakuyanagi, S. Saito, and K. Semba: Nat. Phys. **13**, 44 (2017).
- 63) A. Wallraff, D.I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, J. Majer, M.H. Devoret, S. M. Girvin, and R.J. Schoelkopf: Phys. Rev. Lett. **95**, 060501 (2005).
- 64) J. Majer, J.M. Chow, J.M. Gambetta, J. Koch, B.R. Johnson, J.A. Schreier, L. Frunzio, D.I. Schuster, A.A. Houck, A. Wallraff, A. Blais, M.H. Devoret, S.M. Girvin, and R.J. Schoelkopf: Nature **449**, 443 (2007).
- 65) J.A. Schreier, A.A. Houck, J. Koch, D.I. Schuster, B.R. Johnson, J.M. Chow, J.M. Gambetta, J. Majer, L. Frunzio, M.H. Devoret, S.M. Girvin, and R.J. Schoelkopf: Phys. Rev. B **77**, 180502 (R) (2008).
- 66) L. DiCarlo, J.M. Chow, J.M. Gambetta, L.S. Bishop, B.R. Johnson, D.I. Schuster, J. Majer, A. Blais, L. Frunzio, S.M. Girvin, and R.J. Schoelkopf: Nature **460**, 240 (2009).
- 67) L. DiCarlo, M.D. Reed, L. Sun, B.R. Johnson, J.M. Chow, J.M. Gambetta, L. Frunzio, S.M. Girvin, M.H. Devoret, and R.J. Schoelkopf: Nature **467**, 574 (2010).
- 68) H. Paik, D.I. Schuster, L.S. Bishop, G. Kirchmair, G. Catelani, A.P. Sears, B.R. Johnson, M.J. Reagor, L. Frunzio, L.I. Glazman, S.M. Girvin, M.H. Devoret, and R.J. Schoelkopf: Phys. Rev. Lett. **107**, 240501 (2011).
- 69) C. Wang, Y.Y. Gao, P. Reinhold, R.W. Heeres, N. Ofek, K. Chou, C. Axline, M. Reagor, J. Blumoff, K.M. Sliwa, L. Frunzio, S.M. Girvin, L. Jiang, M. Mirrahimi, M.H. Devoret, and R.J. Schoelkopf: Science **352**, 1087 (2016).
- 70) C. Rigetti, J.M. Gambetta, S. Poletto, B.L.T. Plourde, J.M. Chow, A.D. Córcoles, J.A. Smolin, S.T. Merkel, J.R. Rozen, G.A. Keefe, M.B. Rothwell, M.B. Ketchen, and M. Steffen: Phys. Rev. B **86**, 100506 (R) (2012).
- 71) J.M. Gambetta, J.M. Chow, and M. Steffen: npj Quantum Information **3**, 2 (2017).
- 72) E. Lucero, R. Barends, Y. Chen, J. Kelly, M. Mariantoni, A. Megrant, P. O'Malley, D. Sank, A. Vainsencher, J. Wenner, T. White, Y. Yin, A.N. Cleland, and J.M. Martinis: Nat. Phys. **8**, 719 (2012).
- 73) R. Barends, J. Kelly, A. Megrant, D. Sank, E. Jeffrey, Y. Chen, Y. Yin, B. Chiaro, J. Mutus, C. Neill, P. O'Malley, P. Roushan, J. Wenner, T.C. White, A.N. Cleland, and J.M. Martinis: Phys. Rev. Lett. **111**, 080502 (2013).
- 74) <https://quantumexperience.ng.bluemix.net/>
- 75) D. Alsina and J.I. Latorre: Phys. Rev. A **94**, 012314 (2016).
- 76) S.J. Devitt: Phys. Rev. A **94**, 032329 (2016).
- 77) R. Versluis, S. Poletto, N. Khammassi, N. Haider, D.J. Michalak, A. Bruno, K. Bertels, and L. DiCarlo: arXiv:1612.08208 (2016).
- 78) D. Schaeffer, A. Nucciotti, F. Alessandria, R. Ardito, M. Barucci, L. Risegari, G. Ventura, C. Bucci, G. Frossati, M. Olcese, and A. de Waard: J. Phys.: Conf. Ser. **150**, 012042 (2009).
- 79) J.L. Ouellet: arXiv:1410.1560 (2014).
- 80) M.A. Nielsen and I.L. Chuang: *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, 2000).
- 81) D. Risté, S. Poletto, M.-Z. Huang, A. Bruno, V. Vesterinen, O.-P. Saira, and L. DiCarlo: Nat. Commun. **6**, 6983 (2015).
- 82) J.M. Chow, J.M. Gambetta, E. Magesan, D.W. Abraham, A.W. Cross, B.R. Johnson, N.A. Masluk, C.A. Ryan, J.A. Smolin, S.J. Srinivasan, and M. Steffen: Nat. Commun. **5**, 4015 (2014).
- 83) A.D. Córcoles, E. Magesan, S.J. Srinivasan, A.W. Cross, M. Steffen, J.M. Gambetta, and J.M. Chow: Nat. Commun. **6**, 6979 (2015).
- 84) M. Takita, A.D. Córcoles, E. Magesan, B. Abdo, M. Brink, A. Cross, J.M. Chow, and J.M. Gambetta: Phys. Rev. Lett. **117**, 210505 (2016).
- 85) J. Kelly, R. Barends, A.G. Fowler, A. Megrant, E. Jeffrey, T.C. White, D. Sank, J.Y. Mutus, B. Campbell, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, I.-C. Hoi, C. Neill, P.J.J. O'Malley, C. Quintana, P. Roushan, A. Vainsencher, J. Wenner, A.N. Cleland, and J.M. Martinis: Nature **519**, 66 (2015).
- 86) N. Ofek, A. Petrenko, R. Heeres, P. Reinhold, Z. Leghtas, B. Vlastakis, Y. Liu, L. Frunzio, S.M. Girvin, L. Jiang, M. Mirrahimi, M.H. Devoret, and R.J. Schoelkopf: Nature **536**, 441 (2016).
- 87) B. Vlastakis, G. Kirchmair, Z. Leghtas, S.E. Nigg, L. Frunzio, S.M. Girvin, M. Mirrahimi, M.H. Devoret, and R.J. Schoelkopf: Science **342**, 607 (2013).
- 88) L. Sun, A. Petrenko, Z. Leghtas, B. Vlastakis, G. Kirchmair, K.M. Sliwa, A. Narla, M. Hatridge, S. Shankar, J. Blumoff, L. Frunzio, M. Mirrahimi, M.H. Devoret, and R.J. Schoelkopf: Nature **511**, 444 (2014).
- 89) S. Tarucha, D.G. Austing, T. Honda, R.J. van der Hage, and L.P. Kouwenhoven: Phys. Rev. Lett. **77**, 3613 (1996).
- 90) D. Loss and D.P. DiVincenzo: Phys. Rev. A **57**, 120 (1998).
- 91) B.E. Kane: Nature **393**, 133 (1998).
- 92) M. Ciorga, A.S. Sachrajda, P. Hawrylak, C. Gould, P. Zawadzki, S. Jullian, Y. Feng, and Z. Wasilewski: Phys. Rev. B **61**, R16315 (R) (2000).
- 93) L.M.K. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyta, C.S. Yannoni, M.H. Sherwood, and I.L. Chuang: Nature **414**, 883 (2001).
- 94) J.M. Elzerman, R. Hanson, J.S. Greidanus, L.H. Willems van Beveren, S. De Franceschi, L.M.K. Vandersypen, S. Tarucha, and L.P. Kouwenhoven: Phys. Rev. B **67**, 161308 (R) (2003).
- 95) J.M. Elzerman, R. Hanson, L.H. Willems van Beveren, B. Witkamp, L.M. K. Vandersypen, and L.P. Kouwenhoven: Nature **430**, 431 (2004).
- 96) F.H.L. Koppens, C. Buizert, K.J. Tielrooij, I.T. Vink, K.C. Nowack, T. Meunier, L.P. Kouwenhoven, and L.M.K. Vandersypen: Nature **442**, 766 (2006).
- 97) K.C. Nowack, F.H.L. Koppens, Yu. V. Nazarov, and L.M.K. Vandersypen: Science **318**, 1430 (2007).
- 98) K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, and S. Tarucha: Science **297**, 1313 (2002).
- 99) M. Pioro-Ladrière, T. Obata, Y. Tokura, Y.-S. Shin, T. Kubo, K. Yoshida,

- T. Taniyama, and S. Tarucha: Nat. Phys. 4, 776 (2008).
- 100) T. Obata, M. Pioro-Ladrière, Y. Tokura, Y.-S. Shin, T. Kubo, K. Yoshida, T. Taniyama, and S. Tarucha: Phys. Rev. B 81, 085317 (2010).
- 101) J.R. Petta, A.C. Johnson, J.M. Taylor, E.A. Laird, A. Yacoby, M.D. Lukin, C.M. Marcus, M.P. Hanson, and A.C. Gossard: Science 309, 2180 (2005).
- 102) R. Brunner, Y.-S. Shin, T. Obata, M. Pioro-Ladrière, T. Kubo, K. Yoshida, T. Taniyama, Y. Tokura, and S. Tarucha: Phys. Rev. Lett. 107, 146801 (2011).
- 103) K.C. Nowack, M. Shafiei, M. Laforest, G.E.D.K. Prawiroatmodjo, L.R. Schreiber, C. Reichl, W. Wegscheider, and L.M.K. Vandersypen: Science 333, 1269 (2011).
- 104) A.C. Johnson, J.R. Petta, J.M. Taylor, A. Yacoby, M.D. Lukin, C.M. Marcus, M.P. Hanson, and A.C. Gossard: Nature 435, 925 (2005).
- 105) F.H.L. Koppens, J.A. Folk, J.M. Elzerman, R. Hanson, L.H. Willems van Beveren, I.T. Vink, H.P. Tranitz, W. Wegscheider, L.P. Kouwenhoven, and L.M.K. Vandersypen: Science 309, 1346 (2005).
- 106) D.J. Reilly, J.M. Taylor, J.R. Petta, C.M. Marcus, M.P. Hanson, and A.C. Gossard: Science 321, 817 (2008).
- 107) S. Foletti, H. Bluhm, D. Mahalu, V. Umansky, and A. Yacoby: Nature Phys. 5, 903 (2009).
- 108) K.M. Itoh and H. Watanabe: MRS Commun. 4, 143 (2014).
- 109) A. Morello, J.J. Pla, F.A. Zwanenburg, K.W. Chan, K.Y. Tan, H. Huebl, M. Möttönen, C.D. Nugroho, C. Yang, J.A. van Donkelaar, A.D.C. Alves, D.N. Jamieson, C.C. Escott, L.C.L. Hollenberg, R.G. Clark, and A.S. Dzurak: Nature 467, 687 (2010).
- 110) J.J. Pla, K.Y. Tan, J.P. Dehollain, W.H. Lim, J.J.L. Morton, D.N. Jamieson, A.S. Dzurak, and A. Morello: Nature 489, 541 (2012).
- 111) J.J. Pla, K.Y. Tan, J.P. Dehollain, W.H. Lim, J.J.L. Morton, F.A. Zwanenburg, D.N. Jamieson, A.S. Dzurak, and A. Morello: Nature 496, 334 (2013).
- 112) J.T. Muhonen, J.P. Dehollain, A. Laucht, F.E. Hudson, R. Kalra, T. Sekiguchi, K.M. Itoh, D.N. Jamieson, J.C. McCallum, A.S. Dzurak, and A. Morello: Nat. Nanotechnol. 9, 986 (2014).
- 113) J.P. Dehollain, S. Simmons, J.T. Muhonen, R. Kalra, A. Laucht, F. Hudson, K.M. Itoh, D.N. Jamieson, J.C. McCallum, A.S. Dzurak, and A. Morello: Nat. Nanotechnol. 11, 242 (2016).
- 114) S. Freer, S. Simmons, A. Laucht, J.T. Muhonen, J.P. Dehollain, R. Kalra, F.A. Mohiyaddin, F.E. Hudson, K.M. Itoh, J.C. McCallum, D.N. Jamieson, A. S Dzurak, and A. Morello: Quantum Sci. Technol. 2, 015009 (2017).
- 115) A. Laucht, R. Kalra, S. Simmons, J.P. Dehollain, J.T. Muhonen, F.A. Mohiyaddin, S. Freer, F.E. Hudson, K.M. Itoh, D.N. Jamieson, J.C. McCallum, A.S. Dzurak, and A. Morello: Nat. Nanotechnol. 12, 61 (2016).
- 116) J. van Donkelaar, C. Yang, A.D.C. Alves, J.C. McCallum, C. Hougaard, B. C. Johnson, F.E. Hudson, A.S. Dzurak, A. Morello, D. Spemann, and D. N. Jamieson: J. Phys.: Condens. Matter 27, 154204 (2015).
- 117) S.R. Schofield, N.J. Curson, M.Y. Simmons, F.J. Rueß, T. Hallam, L. Oberbeck, and R.G. Clark: Phys. Rev. Lett. 91, 136104 (2003).
- 118) G. Tosi, F.A. Mohiyaddin, H. Huebl, and A. Morello: AIP Adv. 4, 087122 (2014).
- 119) A. Laucht, J.T. Muhonen, F.A. Mohiyaddin, R. Kalra, J.P. Dehollain, S. Freer, F.E. Hudson, M. Veldhorst, R. Rahman, G. Klimeck, K.M. Itoh, D. N. Jamieson, J.C. McCallum, A.S. Dzurak, and A. Morello: Sci. Adv. 1, e1500022 (2015).
- 120) M. Veldhorst, J.C.C. Hwang, C.H. Yang, A.W. Leenstra, B. de Ronde, J.P. Dehollain, J.T. Muhonen, F.E. Hudson, K.M. Itoh, A. Morello, and A.S. Dzurak: Nat. Nanotechnol. 9, 981 (2014).
- 121) M. Veldhorst, C.H. Yang, J.C.C. Hwang, W. Huang, J.P. Dehollain, J.T. Muhonen, S. Simmons, A. Laucht, F.E. Hudson, K.M. Itoh, A. Morello, and A.S. Dzurak: Nature 526, 410 (2015).
- 122) R. Maurand, X. Jehl, D. Kotekar-Patil, A. Corna, H. Bohuslavskiy, R. Laviéville, L. Hutin, S. Barraud, M. Vinet, M. Sanquer, and S. De Franceschi: Nat. Commun. 7, 13575 (2016).
- 123) B.M. Maune, M.G. Borselli, B. Huang, T.D. Ladd, P.W. Deelman, K.S. Holabird, A.A. Kiselev, I. Alvarado-Rodriguez, R.S. Ross, A.E. Schmitz, M. Sokolich, C.A. Watson, M.F. Gyure, and A.T. Hunter: Nature 481, 344 (2012).
- 124) K. Eng, T.D. Ladd, A. Smith, M.G. Borselli, A.A. Kiselev, B.H. Fong, K. S. Holabird, T.M. Hazard, B. Huang, P.W. Deelman, I. Milosavljevic, A.E. Schmitz, R.S. Ross, M.F. Gyure, and A.T. Hunter: Sci. Adv. 1, e1500214 (2015).
- 125) E. Kawakami, P. Scarlino, D.R. Ward, F.R. Braakman, D.E. Savage, M.G. Lagally, M. Friesen, S.N. Coppersmith, M.A. Eriksson, and L.M.K. Vandersypen: Nat. Nanotechnol. 9, 666 (2014).
- 126) E. Kawakami, T. Jullien, P. Scarlino, D.R. Ward, D.E. Savage, M.G. Lagally, V.V. Dobrovitski, M. Friesen, S.N. Coppersmith, M.A. Eriksson, and L.M.K. Vandersypen: Proc. Natl. Acad. Sci. USA 113, 11738 (2016).
- 127) K. Takeda, J. Kamioka, T. Otsuka, J. Yoneda, T. Nakajima, M.R. Delbecq, S. Amaha, G. Allison, T. Kodera, S. Oda, and S. Tarucha: Sci. Adv. 2, e1600694 (2016).
- 128) D.M. Zajac, T.M. Hazard, X. Mi, E. Nielsen, and J.R. Petta: Phys. Rev. Applied 6, 054013 (2016).
- 129) S.J. Weber, G.O. Samach, D. Hover, S. Gustavsson, D.K. Kim, D. Rosenberg, A.P. Sears, F. Yan, J.L. Yoder, W.D. Oliver, and A.J. Kerman: arXiv:1701.06544 (2017).
- 130) D.J. Reilly: npj Quantum Information 1, 15011 (2015).
- 131) T. Brecht, W. Pfaff, C. Wang, Y. Chu, L. Frunzio, M.H. Devoret, and R.J. Schoelkopf: npj Quantum Information 2, 16002 (2016).
- 132) M. Veldhorst, H.G.J. Eenink, C.H. Yang, and A.S. Dzurak: arXiv:1609.09700 (2016).
- 133) L.M.K. Vandersypen, H. Bluhm, J.S. Clarke, A.S. Dzurak, R. Ishihara, A. Morello, D.J. Reilly, L.R. Schreiber, and M. Veldhorst: arXiv:1612.05936 (2016).
- 134) E. Majorana: 素粒子論研究 63, 149 (1981).
- 135) V. Mourik, K. Zuo, S.M. Frolov, S.R. Plissard, E.P.A.M. Bakkers, and L. P. Kouwenhoven: Science 336, 1003 (2012).
- 136) P. Krogstrup, N.L.B. Zino, W. Chang, S.M. Albrecht, M.H. Madsen, E. Johnson, J. Nygård, C.M. Marcus, and T.S. Jespersen: Nat. Mater. 14, 400 (2015).
- 137) W. Chang, S.M. Albrecht, T.S. Jespersen, F. Kuemmeth, P. Krogstrup, J. Nygård, and C.M. Marcus: Nat. Nanotechnol. 10, 232 (2015).
- 138) S.M. Albrecht, A.P. Higginbotham, M. Madsen, F. Kuemmeth, T.S. Jespersen, J. Nygård, P. Krogstrup, and C.M. Marcus: Nature 531, 206 (2016).
- 139) M.T. Deng, S. Vaitiekėnas, E.B. Hansen, J. Danon, M. Leijnse, K. Flensberg, J. Nygård, P. Krogstrup, and C.M. Marcus: Science 354, 1557 (2016).
- 140) D. Gottesman: Nature 540, 44 (2016).

(2017年1月24日 受理)

Profile



阿部 英介 (あべ えいすけ)

2006年慶應義塾大学院理工学研究科博士課程修了。博士(理学)。東京大学物性研究所助手。英国オックスフォード大学博士研究員。独立行政法人理化学研究所創発物性科学研究センター研究員などを経て現在、慶應義塾大学スピントロニクス研究センター特任准教授。



伊藤 公平 (いとう こうへい)

1994年米国カリフォルニア大学バークレー校よりPh. D. 95年慶應義塾大学助手。専任講師、助教授を経て07年より教授。日本物理学会理事(02~04年)。物理系欧文誌刊行協会理事(04~06年)。学術会議連携会員(11年~)。応用物理学会理事(16年~)。