

量子コンピュータの現状と展望

世話人：齊藤 志郎、根本 香絵、寺井 弘高、山梨 祐希

新原理コンピュータとして期待されている量子コンピュータは、従来のコンピュータでは解くことが難しい問題に対し、量子力学的な現象を利用して解を得ることが可能である。ゲート型の万能量子コンピュータには、量子性による加速が証明されたアルゴリズムが存在する。また、組み合わせ最適化問題に力を発揮する量子アニーラも、現実的な社会問題に応用できるため注目を集めている。これら量子コンピュータの開発は、近年の量子状態制御技術の発展に伴い、急速な進歩を遂げている。例えば、前者では IBM、後者では D-Wave Systems が商用超伝導量子コンピュータを開発している。2019 年には Google が超伝導量子コンピュータを用いて量子超越性を検証し、2020 年には中国科学技術大学が光量子コンピュータにより量子優位性を実現した。このように、量子コンピュータは、様々な物理系においてそれぞれの長所を活かしながら発展している。

本シンポジウムは、大分類 3 光・フォトンクス、大分類 11 超伝導、量子情報工学研究会の共催シンポジウムとして企画され、2021 年 3 月 16 日(火)午後オンラインにて開催された。超伝導・半導体・光・原子といった幅広い分野から、量子コンピュータ研究の最前線でご活躍される 7 名の先生方にご講演いただき、量子コンピュータの現状と展望を学び、分野を横断する大局的な議論を促すことを目的とした。前半は超伝導に関連する招待講演 4 件、後半は光・原子・半導体の各分野から 1 件ずつの招待講演が行われた。

最初のご講演では、超伝導量子ビットの先駆者である東京理科大学の蔡先生から「平面実装可能な超伝導量子コンピュータ」と題して、エアブリッジを用いたクロスレゾネータによる平面実装方法の紹介があった。16 量子ビットチップの作製が進み、個々の測定では 1 量子ビットゲート、2 量子ビットゲート、読み出しにおいて、それぞれ 99.9%, 96.7%, 95% のフィデリティが達成されている。また、量子ビットチップ作製後のバッファードフッ酸による表面処理により、共振器の Q 値が 2 倍、量子ビットの T_1 が 5 倍改善したという報告がなされた。最後に、1 方向量子計算に向けた、時間軸上の 3 ビットのクラスタ状態生成が紹介された。

理化学研究所の田淵先生からは「超伝導量子コンピュータの現状と展望—集積化とシステム化への課題—」と題して、超伝導量子コンピュータチップの集積化における 3 つの課題とそれに向けた取り組みが紹介された。具体的には、量子ビットの寿命延長、均一性向上、および多層配線である。さらに、チップ周辺の配線に関する改善策として、透過型低温増幅器や光配線による大規模多重化の例が紹介された。

産業技術総合研究所の川畑先生からは「超伝導量子アニーリングマシン工学」と題して、量子アニーリングの基礎から D-Wave 2000Q の最新状況までの説明があった。その上で、実用化に向けてコヒーレンス時間の延長と更なる大規模化が必要であることを述べ、シリコン貫通ビアやフリップチップ実装などの 3 次元実装技術を用いた超伝導大規模量子アニーリングマシンの開発が紹介された。すでに、産総研では、NOR 回路に対応する 3 量子ビットからなる量子アニーリングマシンの極低温動作が確認されている。

日本電信電話株式会社の Vastidas 先生からは「Quantum Simulation with Periodically-driven Superconducting Quantum Processors」と題して、中国科学技術大学との共同研究による量子シミュレーションに関する研究が紹介された。12 超伝導量子ビットからなる一次元の量子ビット列を用い、量子ゲートの代わりに系のパラメータを部分的にモジュレートすることで、全体に複雑な現象が生起されることを実験的に示した。量子複雑性は量子コンピュータのリソースとしても応用可能で、また輸送現象としても応用が期待されることが紹介された。

後半最初のご講演は、東京大学の武田先生から「光量子コンピュータの現状と展望」と題して、「なぜ光なのか」という疑問から始まり、光量子コンピュータの原理、大規模化に向けた展望をご紹介頂いた。まず、確率的な演算を克服するために、光の波動性すなわち連続量変数を利用した量子ビットのコーディングを行い、次に大規模化に向けて、ファイバーループ中に多数の光パルスを閉じ込める。このように、大規模化に向けた道筋は見えてきているが、プログラマブルな量子光源や高品質な光回路が必要であることにも言及された。

分子科学研究所の大森先生からは「アト秒精度の超高速量子シミュレータ開発と量子コンピュータへの応用」と題して、冷却原子を使った量子シミュレータ・量子コンピュータに関する研究が紹介された。リユードベリ原子を規則的に配置し、超高速パルス光とアト秒精度のコヒーレント制御により、金属状の量子気体をシミュレーションすることに成功されている。さらに 50 原子の任意配列を実現し、ゲート型量子計算を念頭に ^{87}Rb の超微細構造を用いた量子ビットの性能を評価して、読み出し効率 97%、 $T_1 > 1 \text{ s}$ 、 $T_2^* = 30 \text{ ms}$ 、ゲート時間 $100 \text{ } \mu\text{s}$ を達成した実験が紹介された。

産業技術総合研究所の森先生からは「シリコン量子コンピュータの研究開発動向」と題して、トランジスタ研究者の観点から、シリコン量子コンピュータの現状と展望をご紹介頂いた。世界的に、これまでコンピュータを作ってきた各階層の人材が量子に参入しており、量子専用の開発用技術群の整備が進んでいる。デバイスに関しては、1K で動作するシリコン量子ビットが紹介され、希釈冷凍機を必要としない固体素子量子コンピュータ実現の可能性を示された。さらに半導体製造技術を活かした高集積密度化への期待が述べられた。

オンライン開催であった本シンポジウムには 300 人を超える聴講者が参加し、活発な議論がなされ、盛況なシンポジウムとなった。本シンポジウムでの議論から、量子技術に興味を持つ研究者が増え、さらなるブレイクスルーが起きることを期待している。